

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

Josip Karačić

Zagreb, 2019. godina.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

Mentori:

prof. dr. sc. Smiljko Rudan

Student:

Josip Karačić

Zagreb, 2019. godina.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**  
Središnje povjerenstvo za završne i diplomске ispite  
Povjerenstvo za završne i diplomске ispite studija brodogradnje



Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Josip Karačić** Mat. br.: 0023100243

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Odziv privezanog broda na pravilnim valovima**

Naslov rada na engleskom jeziku: **The response of a moored ship in regular waves**

Opis zadatka:

Privezani brodovi u manje zaštićenim lukama izloženi su djelovanju valova. Na njihov odziv, osim samih značajki broda, utječe i način priveza. Privez u tom smislu predstavlja sustav koji se sastoji od užadi, bokoštitnika te drugih elemenata koji osiguravaju brod od oštećenja.

U diplomskom radu potrebno je najprije razmotriti sve aspekte problema privezanog broda izloženog pravilnim valovima. Zatim, na primjeru broda za skladištenje ukapljenog plina i dostupnog modela broda, valja razraditi realističan scenarij priveza i valnog opterećenja.

Hidrodinamički odziv privezanog broda, uz razumna pojednostavljenja, potrebno je odrediti u programskom paketu Hydrostar, na način da odrede rezultirajuće sile na brod te hidrodinamičke reakcije.


Zatim, u softverskom paketu LS-Dyna potrebno je postaviti numerički model koji će realno modelirati brod kao kruto tijelo te užad i bokoštitnike kao elastična tijela. Također, na taj model potrebno je prenijeti prethodno izračunate sile valnog opterećenja te provesti analizu odziva broda za definirani scenarij.


U diplomskom radu potrebno je shematski prikazati sve korake opisanog postupka proračuna odziva broda. Također, potrebno je jasno navesti sva pojednostavljenja, kao i prednosti i nedostatke takvog postupka, te mogućnost za poboljšanje postupka ovakvog proračuna za realne probleme.

Zadatak zadan:  
17. siječnja 2019.

Datum predaje rada:  
21. ožujka 2019.

Predviđeni datumi obrane:  
27., 28. i 29. ožujka 2019.

Zadatak zadao:  
  
Izv. prof. dr. sc. Smiljko Rudan

Predsjednica Povjerenstva:  
  
Prof. dr. sc. Nastia Degiuli

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i uz navedenu literaturu.

Zahvaljujem se prof. dr. sc. Smiljku Rudanu na velikoj pomoći, strpljenju i izdvojenom vremenu.

Posebno se zahvaljujem svojoj obitelji koja mi je omogućila bezbrižno studiranje.

Bogu hvala i slava!!

Josip Karačić

## Sadržaj

<b>1. UVOD</b>	<b>1</b>
<b>2. OSNOVNA OBILJEŽJA LNG BRODOVA</b>	<b>2</b>
2.2. Tehničko tehnološka obilježja LNG terminala	5
1.3. Tehničko tehnološka obilježja FSRU terminala na otoku Krku	5
<b>3. POMORSTVENOST PLOVNOG OBJEKTA</b>	<b>7</b>
3.1. Morski valovi	7
3.2. Pravilni valovi	8
3.3. Princip superpozicije	8
3.4. Njihanje broda na pravilnim valovima	9
3.4.1. Koordinatni sustavi	9
3.4.2. Susretni kut i susretna frekvencija	10
3.5. Difrakcijski i radijacijski valovi	11
3.6. Tlakovi i sile na oplakanoj površini	13
3.6.1. Valna uzbuda	14
3.6.2. Hidrodinamička reakcija	14
3.6.3. Povratna sila	15
<b>4. PROGRAMSKI PAKET LS-DYNA</b>	<b>16</b>
4.1. Općenito o LS-DYNA-i	16
4.2. LS-DYNA/MCOL	18
<b>5. PRORAČUN ODZIVA BRODA U HydroSTAR-u</b>	<b>21</b>
5.1. Princip rada programa HydroSTAR	21
5.2. Postupak provedbe proračuna	22
<b>6. PRORAČUN OPTEREĆENJA PRIVEZNIH LINIJA</b>	<b>24</b>
6.1. Sile vjetra	24
6.2. Sile morske struje	26
6.3. Rezultati proračuna sila vjetra i morske struje	29
6.4. Proračun koeficijenta sigurnosti priveznih linija	32
<b>7. GUMENI ODBOJNICI</b>	<b>35</b>
7.1. Osnovni princip rada odbojnika	35
7.2. Odabir odbojnika	36
7.3. Određivanje energije pristajanja	36
7.3.1. Koeficijent ekscentriciteta $C_e$	38

6.3.2. Koeficijent dodane mase $C_m$ .....	39
7.3.3. Koeficijent mekoće $C_s$ .....	39
7.3.4. Koeficijent konfiguracije pristaništa $C_c$ .....	40
7.3.5. Koeficijent vršne energije udara.....	40
<b>8. OPIS NUMERICKOG MODELA</b> .....	<b>41</b>
8.1. Model broda.....	41
8.2. Model pristaništa.....	42
8.3. Model odbojnika.....	42
8.4. Privezne linije.....	43
8.5. Materijali.....	45
8.5.1. Materijalni model krutog tijela.....	45
8.5.2. Materijalni model gumenih odbojnika.....	46
8.5.3. Materijalni model priveznih linija.....	47
8.6. Rubni uvjeti.....	47
8.6.1. Pritezanje priveznih linija.....	47
8.6.2. Definiranje kontakta.....	48
8.6.2. Pozivanje programa MCOL.....	48
8.7. Definiranje opterećenja.....	49
8.7.1. Zadavanje gravitacije.....	50
<b>9. Provedba proračuna i analiza rezultata</b> .....	<b>51</b>
9.1. Prvi slučaj – valovi u bok broda.....	51
9.2. Drugi slučaj – sjeverni vjetar i valovi u bok broda.....	57
9.3. Treći slučaj - jugozapadni vjetra i nailazni valovi pod 135 °.....	61
<b>10. Zaključak</b> .....	<b>66</b>
<b>Literatura</b> .....	<b>67</b>

## POPIS SLIKA

Slika 2.1.	LNG brod sa sfernim tankovima .....	2
Slika 2.2.	LNG brod sa membranskim spremnicima .....	4
Slika 2.3.	LNG terminal .....	5
Slika 2.4.	Projekt LNG terminala na otoku Krku - ilustracija .....	6
Slika 2.1.	Pravilni val [5] .....	8
Slika 2.2.	Superpozicija dvaju pravilnih valova [5] .....	9
Slika 4.1.	Primjena LS-DYNA-e .....	16
Slika 4.2.	Primjena LS-DYNA-e u analizi sudara brodova [8] .....	17
Slika 4.3.	Princip rada LS-DYNA/MCOL [9] .....	18
Slika 5.1.	Susretni kutovi .....	21
Slika 5.2.	Generirana mreža panela .....	22
Slika 5.3.	Definiranje <i>.mec</i> datoteke .....	23
Slika 6.1.	Koeficijent $C_{xw}$ u odnosu na kut upada vjetra [10] .....	25
Slika 6.2.	Koeficijent $C_{yw}$ u odnosu na kut upada vjetra [10] .....	25
Slika 6.3.	Koeficijent $C_{xyw}$ u odnosu na kut upada vjetra [10] .....	26
Slika 6.4.	Koeficijent $C_{xca}$ u odnosu na kut djelovanja morske struje [10] .....	27
Slika 6.5.	Koeficijent $C_{yc}$ u odnosu na kut djelovanja morske struje [10] .....	28
Slika 6.6.	Koeficijent $C_{xyc}$ u odnosu na kut djelovanja morske struje [10] .....	28
Slika 6.7.	Plan priveza – samo kao upute za definiranje parametara priveznih linija [10] .....	32
Slika 7.1.	Apsorbirana energija odbojnika [13] .....	35
Slika 7.2.	Kompresija odbojnika [13] .....	36
Slika 7.3.	Određivanje brzine prilaženja [13] .....	37
Slika 7.4.	Model prilaženja broda [13] .....	38
Slika 8.1.	Opći plan LPG broda 6500 m <sup>3</sup> .....	41
Slika 8.2.	Numerički model broda .....	41
Slika 8.3.	Numerički model pristaništa .....	42
Slika 8.5.	Numerički model jednog od osam odbojnika .....	43
Slika 8.6.	Raspored priveznih linija .....	44
Slika 8.7.	Cijeli model privezanog broda .....	44
Slika 8.8.	Model privezanog broda – pogled s krme .....	45
Slika 8.9.	Cijeli model privezanog broda – pogled odozgo .....	45
Slika 8.10.	Kartica materijala *MAT_RIGID .....	46
Slika 8.11.	Kartica materijala *MAT_MOONEY-RIVLIN_RUBBER .....	46
Slika 8.12.	Ovisnost sile o produljenju najlonskog konopa .....	47
Slika 8.13.	Pomak čvora opruge .....	48
Slika 8.14.	MCOL datoteka .....	49
Slika 8.16.	Točke krivulje opterećenja .....	50
Slika 9.1.	Komponenta uzbudne sile u poprečnom smjeru .....	51
Slika 9.2.	Uzbudni moment ljuljanja .....	52
Slika 9.3.	Uzbudni moment zaošijanja .....	52
Slika 9.4.	Numerički model za prvi slučaj .....	53
Slika 9.2.	Von Mises naprezanja krmenih odbojnika .....	53
Slika 9.3.	Ukupna sila u krmenim konopima .....	54
Slika 9.4.	Ukupna sila u pramčanim konopima .....	54
Slika 9.5.	Ukupna sila u springovima .....	55
Slika 9.10.	Pomak broda oko osi x u vremenu .....	55

Slika 9.11.	Pomak broda oko osi y u vremenu .....	56
Slika 9.12.	Pomak broda oko osi z u vremenu.....	56
Slika 9.13.	Deformacija odbojnika u području krme .....	57
Slika 9.14.	Komponenta sile vjetra u uzdužnom smjeru .....	57
Slika 9.15.	Ukupna sila u krmenim konopima .....	58
Slika 9.16.	Ukupna sila u pramčanim konopima .....	58
Slika 9.17.	Ukupna sila u springovima.....	59
Slika 9.18.	Pomak broda oko osi x .....	59
Slika 9.19.	Pomak broda oko osi y .....	60
Slika 9.20.	Pomak broda oko osi z .....	60
Slika 9.21.	Deformacije odbojnika u području krme .....	61
Slika 9.22.	Komponenta uzbudne sile u uzdužnom smjeru .....	61
Slika 9.23.	Uzbudni moment posrtanja.....	62
Slika 9.24.	Ukupne sile u krmenim konopima .....	62
Slika 9.25.	Ukupna sila u pramčanim konopima .....	63
Slika 9.26.	Ukupna sila u springovima.....	63
Slika 9.27.	Pomak broda oko osi x .....	64
Slika 9.28.	Pomak broda oko osi y .....	64
Slika 9.29.	Pomak broda oko osi z .....	65
Slika 9.30.	Deformacije odbojnika u području krme .....	65



## POPIS TABLICA

Tablica 2.1.	Podjela LNG brodova prema veličini [Stdija] .....	3
Tablica 5.1.	Osnovne dimenzije LPG broda, 6500 m <sup>2</sup> .....	21
Tablica 5.2.	Osnovni podaci za brod u balastu.....	21
Tablica 6.1.	Rezultati proračuna za brzinu vjetra od 25 čvorova .....	29
Tablica 6.2.	Rezultati proračuna za brzinu morske struje od 1 čvor .....	29
Tablica 6.3.	Rezultati proračuna za brzinu vjetra od 50 čvorova .....	30
Tablica 6.4.	Rezultati proračuna za brzinu morske struje od 1.5 čvorova.....	30
Tablica 6.5.	Rezultati proračuna za brzinu vjetra od 80 čvorova .....	31
Tablica 6.6.	Rezultati proračuna za brzinu morske struje od 1.5 čvorova.....	31
Tablica 6.7.	Parametri koje treba definirati .....	32
Tablica 6.8.	Proračun koeficijenta sigurnosti .....	33
Tablica 7.9.	Proračun koeficijenta sigurnosti .....	34
Tablica 7.1.	Rezultati proračuna.....	40
Tablica 8.1.	Osnovne dimenzije LPG broda .....	41

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$d_m$	m	deformacija odbojnika
$f$		koeficijent koji predstavlja učinkovitost odbojnika za apsorbiranje energije
$t$		vremenski korak
$v$	m/s	brzina prilaženja broda okomita na pristanište
$v_c$	m/s	brzina morske struje
$v_w$	m/s	brzina vjetra
$A_b$	m <sup>2</sup>	projicirana površina podvodnog dijela broda u uzdužnom smjeru
$A_e$	m <sup>2</sup>	projicirana površina broda u uzdužnom smjeru
$A_s$	m <sup>2</sup>	projicirana površina broda u poprečnom smjeru
$B$	m	širina broda
$C_b$		koeficijent punoće
$C_c$		koeficijent konfiguracije pristaništa
$C_e$		koeficijent ekscentriteta
$C_m$		koeficijent dodane mase
$C_s$		koeficijent mekoće
$C_{xca}, C_{yc}, C_{xyc}$		koeficijenti u odnosu na kut djelovanja morske struje
$C_{xw}, C_{yw}, C_{xyw}$		koeficijenti u odnosu na kut upada vjetra
$E$	kNm	kinetička energija broda
$Ed$	kNm	projektna energija koju treba apsorbirati odbojnik
$E_f$	kNm	kinetička energija broda koju odbojnici trebaju apsorbirati
$F_i$		amplituda uzbudne sile ili momenta
$F_{xc}$	N	sila morske struje u uzdužnom smjeru
$F_{yc}$	N	sila morske struje u poprečnom smjeru
$F_{xw}$	N	sila vjetra u uzdužnom smjeru
$F_{yw}$	N	sila vjetra u poprečnom smjeru
$K$	m	radijus okretanja broda (ovisi o koeficijentu punoće)
$L$	m	dužina broda
$L_{WL}$	m	dužina vodne linije
$M$	t	masa broda odnosno istisnina
$M_c$	Nm	moment zaošijanja uslijed morske struje
$M_v$	t	dodana masa
$M_w$	Nm	moment zaošijanja uslijed vjetra
$R$	m	horizontalna udaljenost od točke kontakta s odbojnikom do težišta broda
$R_m$	kN	sila reakcije odbojnika
$S$	m <sup>2</sup>	oplakana površina
$T$	m	gaz broda
$\varepsilon_{wi}$		fazni pomaci uzbude u odnosu na val
$\rho_c$	kg/m <sup>3</sup>	gustoća morske vode
$\rho_w$	kg/m <sup>3</sup>	gustoća zraka
$\varphi$	°	kut koji zatvara vektor brzine i dužina $R$
$\Delta$	t	istisnina broda
$\vartheta_c$	°	kut djelovanja morske struje

## SAŽETAK

U radu je bilo potrebno odrediti odziv privezanog broda na pravilnim valovima koristeći programski paket LS-DYNA i programski alat MCOL ugrađen unutar LS-DYNA-e. Osim valova na odziv broda utječe i privezni sustav broda, kao i sustav odbojnika što povećava složenost problema. U radu su opisana osnovna obilježja LNG brodova, te tehničko tehnološka obilježja planiranog LNG terminala na otoku Krku. Navedeni su osnovni pojmovi iz teorije pomorstvenosti plovni objekata, opisano je njihovanje broda na pravilnim valovima te tlakovi i sile koje djeluju na oplakanu površinu broda. Ukratko je opisan programski paket LS-DYNA kao i udruženi rad LS-DYNA/MCOL. Objašnjen je postupak proračuna odziva broda u programu HydroSTAR i način na koji se može uzeti u obzir i utjecaj zida pristaništa. Proveden je proračun priveznog sustava broda i gumenih odbojnika prema pravilima, na temelju kojeg su odabrane dimenzije priveznih linija i odbojnika prema kojima je definiran numerički model bokobrana i priveznih linija u LS-DYNA-i. Detaljno su opisani svi elementi numeričkog modela, postupak njihovog definiranja kao i korišteni materijalni modeli, rubni uvjeti i opterećenja. Na kraju su uspoređeni rezultati numeričkog i analitičkog proračuna za odabrane slučajeve opterećenja.

## 1. UVOD

Projekt LNG terminala na otoku Krku važan je strateški projekt za Republiku Hrvatsku, jer bi se njegovom realizacijom smanjila europska ovisnost o ruskom plinu. Na LNG terminalu u stalnom vezu nalazit će se FSRU brod (*Floating Storage Regasification Unit*), koji služi za prihvata i skladištenje prirodnog plina, te njegovu daljnju isporuku.

Poznavanje ponašanja broda na vezu, kao i vjetrova i morskih struja je od temeljne važnosti za projektiranje luka i terminala. Amplituda odziva privezanog broda uzrokovana je ne samo djelovanjem valova nego i priveznim sustavom. Preveliki pomaci broda utječu na normalno odvijanje prekrcanja broda, mogu prouzročiti oštećenja broda ili pristaništa i posljedično smanjiti učinkovitost veza [1].

Privezni sustav mora uvijek moći odolijevati silama prouzrokovanim vjetrom, morskim strujama, prolazećim brodovima kao i utjecaju vjetrovnih valova i valova mrtvog mora [2]. Privezni sustav koji je projektiran da odolijeva sili vjetra i morskih struja može odolijevati i silama valova. To potvrđuje činjenica da je statička analiza često dovoljna za određivanje potrebnog broja priveznih linija. Ipak kada su sile valova dominantno opterećenje statičku analizu potrebno je zamijeniti dinamičkom [2].

## 2. OSNOVNA OBILJEŽJA LNG BRODOVA

Brodovi za prijevoz ukapljenih plinova jesu brodovi na kojima se teret prevozi u spremnicima pod tlakom višim od atmosferskog da bi se spriječilo miješanje tereta sa zrakom. Zbog toga je u spremnicima samo teret (u tekućem i plinovitom stanju) i stoga ne može doći do stvaranja eksplozivne atmosfere. Općenito, brodovi za prijevoz ukapljenih plinova dijele se na:

1. brodove za prijevoz ukapljenog prirodnog plina (*Liquefied Natural Gas*) – LNG brodovi,
2. brodove za prijevoz ukapljenih naftnih i kemijskih plinova (*Liquefied Petroleum Gas*) – LPG brodovi.

LNG brodovi se koriste za prijevoz prirodnog plina do tržišta, gdje se ukapljeni plin uplinjava i dostavlja cjevovodima prirodnog plina do potrošača. Gustoća LNG-a je otprilike 0,41 do 0,5 kg/dm<sup>3</sup>, ovisno o temperaturi, tlaku i sastavu. Općenito, zbog konstrukcijske izvedbe LNG brodova ukapljeni plin gustoće veće od 0,5 kg/dm<sup>3</sup> (500 kg/m<sup>3</sup>) ne smije se ukrcavati.

Brodovi za prijevoz ukapljenog plina moraju zadovoljiti propise Međunarodne pomorske organizacije (IMO), te sve sigurnosne mjere i mjere protiv onečišćenja okoliša uobičajene za ostale brodove. LNG brodovi moraju zadovoljiti vrlo stroge konstrukcijske zahtjeve. U prvom redu se to odnosi na sposobnost broda da izdrži određeni stupanj oštećenja uslijed sudara, udara ili nasukavanja, a da pritom ne dođe do probijanja tankova tereta. Brodovi građeni poslije 01. siječnja 1996. godine u pogledu konstrukcije i opreme trebaju zadovoljiti Međunarodni pravilnik o konstrukciji i opremi brodova za prijevoz ukapljenih plinova koji je obvezni dio SOLAS konvencije u glavi VII. Stariji brodovi mogu biti građeni prema Pravilniku o konstrukciji i opremi brodova za prijevoz ukapljenih plinova odnosno prema Pravilniku za postojeće brodove. Dodatno, brodovi uobičajeno moraju zadovoljavati i standarde utvrđene od strane Udruženja tankerskih brodara (*Oil Companies Marine International Forum – OCIMF*), a podvrgnuti su i kontinuiranim pregledima utvrđenim od strane tankerske industrije (tzv. *SIRE program – Ship Inspection Report Programme*), odnosno kroz interna pravila Udruženja.



Slika 2.1. LNG brod sa sfernim tankovima

LNG brodovi moraju zadovoljavati standarde sigurnosti i zaštite morskog okoliša koji se primjenjuju isključivo u pomorskom prijevozu LNG-a, koji su redovito na višoj razini od onih uobičajenih u drugim granama industrije, uključujući i pomorski prijevoz sirove nafte, derivata i kemikalija. LNG brodovi moraju imati dvostruku oplatu, posebno izvedene spremnike, crpke, ventile te cjevovode koji podnose tražene uvjete smještaja LNG-a. Prijevoz ukapljenog tekućeg plina zahtijeva veliku stručnost, posebnu opremu u tehnologiju kako bi se na najmanju moguću mjeru smanjio rizik odnosno opasnost bilo koje vrste [3].

Općenito, LNG brodovi mogu se podijeliti obzirom na:

- veličinu
- sustav ugrađenih spremnika na brodu
- vrstu propulzije.

Obzirom na veličinu LNG brodova oni se načelno mogu podijeliti u pet skupina i to obzirom na prijevozni kapacitet izražen u kubičnim metrima i to:

- mali LNG brodovi,
- konvencionalni LNG brodovi (mali i veliki),
- Q-Flex brodovi,
- Q-Max brodovi.

Tablica 2.1. Podjela LNG brodova prema veličini [3]

Klasa LNG broda	Kapacitet [ ×1000 m <sup>3</sup> ]	L [m]	B [m]	T [m]
<b>Q-Max</b>	< 260	345	53-55	12
<b>Q-Flex</b>	200 – 220	315	50	12
<b>Veliki konvencionalni LNG brodovi</b>	150 – 180	285-295	43-46	12
<b>Mali konvencionalni LNG brodovi</b>	120 – 150	270-298	41-49	< 12
<b>Mali LNG brodovi</b>	< 90	< 250	< 40	< 12

Približno do 2008. godine uobičajeni kapacitet LNG brodova kretao se u rasponu od 120.000 m<sup>3</sup> do 150.000 m<sup>3</sup>. Do tada su preko 80% brodova svjetske flote činili mali konvencionalni LNG brodovi, približno 15% mali LNG brodovi te manje od 5% veliki konvencionalni LNG brodovi. Od 2008. do 2010. u svjetsku flotu uključeni su prvi brodovi kapaciteta preko 200.000 m<sup>3</sup> i to brodovi klase Q-Flex i Q-Max kapaciteta od 210.000 do 217.000 m<sup>3</sup> odnosno od 261.700 do 266.000 m<sup>3</sup>. Potonji predstavljaju brodove najnovije generacije, ujedno i najveće koji plove svjetskim morima. Ovi brodovi su u službi nekoliko godina te je do 2016. izgrađeno ukupno 31 Q-Flex te 14 Q-Max brodova.

Dodatno, u posljednjih nekoliko godina uvelike se povećao broj konvencionalnih brodova čiji je kapacitet veći od 150.000 m<sup>3</sup>, ali i dalje znatno manji od kapaciteta Q-Flex ili Q-Max brodova. Primjerice u 2014. godini prosječni kapacitet isporučenih brodova bio je 161.000 m<sup>3</sup> (porast od 12.200 m<sup>3</sup> u odnosu na 2012. godinu). Samo u 2014. godini čak 80% brodova od ukupno ugovorenih novogradnji (ukupno 68 brodova) imali su prijevozni kapacitet između 170.000 i 174.000 m<sup>3</sup> pri čemu nije naručen niti jedan brod kapaciteta većeg od 200.000 m<sup>3</sup>.

Mali LNG brodovi mogu se svrstati u dvije klase i to manji LNG brodovi koji su u svojim tehničko-tehnološkim obilježjima slični konvencionalnim brodovima i čiji je kapacitet manji od  $90.000 \text{ m}^3$ , ali veći od  $45.000 \text{ m}^3$  te na LNG brodove kapaciteta manjeg od navedenih  $45.000 \text{ m}^3$ .

Manji LNG brodovi danas su vrlo rijetki (svjetska flota broji manje od 10 brodova) i prema podacima iz 2014. godine najmanji LNG brod ove klase imao je kapacitet od približno  $64.000 \text{ m}^3$ . Potrebno je naglasiti i da su gotovo sve novogradnje veće od  $150.000 \text{ m}^3$  (krajem 2014. godine samo je jedna novogradnja imala kapacitet manji od  $150.000 \text{ m}^3$ ).

Nasuprot tome, skupina najmanjih LNG brodova dobiva na važnosti i broj takvih brodova se povećava. Najmanji LNG brodovi obuhvaćaju brodove relativno malih kapaciteta: od onih najmanjih od  $1.000 \text{ m}^3$  do onih kapaciteta do  $30.000 \text{ m}^3$  (*LNG Feeder Ships*). Brodovi su namijenjeni prijevozu malih količina LNG-a na kraćim udaljenostima odnosno unutar jedne regije [3].

Dodatno, tehnološki razvoj, strogi ekološki zahtjevi uvjetovali su izgradnju trgovačkih brodova koji će za pogon koristiti LNG, a samim time potrebu izgradnje opskrbnih LNG brodova (*LNG Bunker Vessels*) koji uobičajeno plove unutar pojedinih lučkih područja.

Svjetska flota najmanjih LNG brodova je relativno mala i 2017. godine u svijetu je bilo 44 broda. Međutim, od 2015. godine došlo je do naglog povećanja narudžbe takvih brodova pa trenutno svjetska flota, uključujući i brodove u gradnji obuhvaća približno 80 brodova. Brodovi uključuju:

- LNG brodove,
- CNG brodove (*Compressed Natural Gas*), odnosno brodove koji prevoze teret u plinovitom stanju pod visokim tlakom,
- višenamjenske LNG/LPG/etilen brodove sa dvostrukom propulzijom
- LNG opskrbe brodove [3].



Slika 2.2. LNG brod sa membranskim spremnicima



## 2.2. Tehničko tehnološka obilježja LNG terminala

Na LNG terminalu nalaze se postrojenja koja omogućuju ukapljivanje ili uplinjavanje prirodnog plina. Na ukrcajnom terminalu prirodni plin se ukapljuje na temperaturi od oko  $-160\text{ }^{\circ}\text{C}$  gdje mu se smanjuje volumen za otprilike 600 puta. Tako ohlađen LNG prevozi se brodovima do iskrcajnog terminala (obalni terminal ili FSRU terminal) gdje se vrši uplinjavanje i isporuka prirodnog plina.

FSRU terminal za prirodni plin služi za prihvrat LNG brodova, skladištenje te uplinjavanje i isporuku prirodnog plina u plinsku distribucijsku mrežu. FSRU terminal se sastoji od kopnenog dijela i FSRU broda koji je uobičajeno prerađeni postojeći LNG tanker ili novoizgrađeni LNG tanker namijenjen korištenju kao FSRU. FSRU brod se privezuje na izgrađeni obalni pristan te služi kao mjesto za privez LNG brodova koji ga opskrbljuju ukapljenim prirodnim plinom. Zbog svojih obilježja, osim kao mjesto iskrcaja plina može se koristiti i kao ukrcajni terminal i to kao stanica za opskrbu manjih plovnih jedinica kao što su tegljači, manji ro-ro putnički brodovi, teglenice te općenito prijevozna sredstva koja koriste LNG kao pogonsko gorivo [3].



Slika 2.3. LNG terminal

## 1.3. Tehničko tehnološka obilježja FSRU terminala na otoku Krku

LNG FSRU terminal Krk planira se smjestiti na sjeverozapadni dio otoka Krka na rtu Zaglav, području koje pripada općini Omišalj i koje se nalazi u Primorsko-goranskoj županiji. Lokacija je približno 1.5 km jugozapadno od mjesta Omišalj i oko 2 km sjeverno od mjesta Njivice. FSRU terminal se prvenstveno namjerava koristiti kao prihvatno uplinjavajući terminal iz kojeg će se prirodni plin distribuirati kopnenim plinovodom do krajnjih potrošača, ali i s mogućnošću ukrcaja ukapljenog prirodnog plina na manje LNG brodove u razvoju (*LNG Feeder Ships*).

FSRU terminal će se sastojati od:

- FSRU broda,
- obalnog pristana (*Jetty*),



- opreme na obali koja će povezivati FSRU brod i plinsku mrežu.

Kapacitet FSRU terminala se planira u rasponu od 160.000 m<sup>3</sup> do 265.000 m<sup>3</sup> pri čemu je najvjerojatniji kapacitet od 170.000 m<sup>3</sup> s kapacitetom uplinjavanja od 2.6 do 3.5 mlrd. m<sup>3</sup> godišnje [3].



Slika 2.4. Projekt LNG terminala na otoku Krku - ilustracija

### 3. POMORSTVENOST PLOVNOG OBJEKTA

Pomorstvenost plovnog objekta primjenjuje se u analizi njegova odziva na morskim valovima radi procjene njegove operativnosti i sigurnosti na nemirnom moru. Dostupna saznanja o teoriji njihanja koriste se u fazi osnivanja broda kao i tijekom njegove eksploatacije. Dinamika njihanja broda opisana je jednadžbama njihanja koje uravnotežuju vanjske sile i momente koji djeluju na brod s unutrašnjim silama i momentima uslijed inercije. Pri tome se uzburkano more smatra slučajnim procesom čije se značajke mogu odrediti spektralnom analizom. Jednako tako i odziv broda je slučajan proces koji se može razmatrati sa stanovišta spektralne analize. Važno je istaknuti da se poznavajući odziv broda na harmonijskim valovima različitih frekvencija može odrediti odziv broda na slučajnom, odnosno morskom valovlju. Dobiveni rezultati omogućuju odabir pomorstveno zadovoljavajuće forme broda u ranijoj fazi projekta broda, što znatno poboljšava i olakšava konstruiranje zahtjevnijih brodova s obzirom na kriterije njihanja [4].

#### 3.1. Morski valovi

Površina mora često je veoma nepravilna, a ta se nepravilnost očituje u neravninama koje u svakom trenutku mijenjaju svoj oblik.

Gravitacijski valovi nastaju na nekoliko načina:

1. uslijed gravitacijske privlačnosti nebeskih tijela (posebice Sunca i Mjeseca); nazivaju se plimni valovi
2. uslijed pomaka morskog dna zbog potresa, erupcije vulkana ili klizanja tla; nazivaju se seizmički valovi ili tsunami (*jap. soo-NAH-mee*) što znači val koji se približava obali
3. zbog normalnih i tangencijalnih sila kojima je uzrok vjetar; nazivaju se vjetrovni valovi [4]

Valovi stvoreni djelovanjem vjetra na morskoj površini mogu se podijeliti na dvije grupe:

- Vjetrovni valovi (*eng. sea winf generated waves*) nastaju uslijed djelovanja vjetra na morskoj površini. Uslijed djelovanja vjetra dolazi do promjena tlaka zraka na morskoj površini. Na mjestu sniženog tlaka zraka uzdiže se stupac vode koji se zatim prenosi s jednog mjesta na drugo. Promatranjem valova lako se da uočiti da se masa vode ne pokreće u horizontalnoj ravnini, već samo u vertikalnom smjeru, što znači da se prenosi stupac vode.
- Valovi mrtvog mora (*eng. swell – nabreknúće, oteklina*) su valovi koji su nastali u području u kojem postoji lokalni vjetar, a pristižu u drugo područje u kojem ili nema vjetra ili su razvijeni valovi zbog puhanja vjetra drugog smjera. Valovi mrtvog mora ne ovise više o vjetru, kada su jednom apsorbirali energiju vjetra oni se šire dok ne zamru uslijed prigušenja [5].

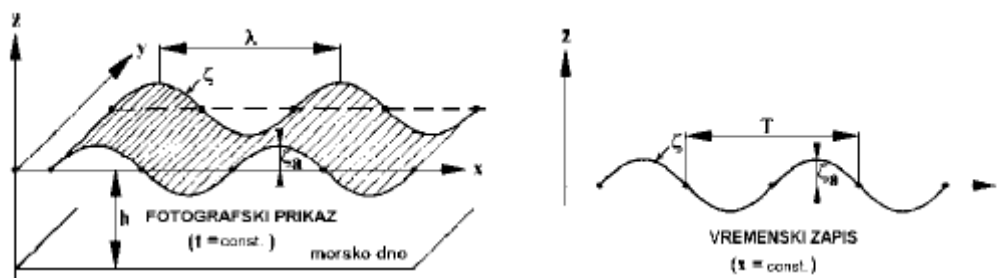
### 3.2. Pravilni valovi

Naziv pravilni (harmonijski) valovi odnosi se na periodično ponavljanje valnih obilježja u vremenu i prostoru. Karakteriziraju ih slijedeća svojstva:

- središte koordinatnog sustava nalazi se na razini mirne vode i vertikalna os  $z$  je usmjerena prema gore,
- dubina vode  $h$  je udaljenost mjerena od razine morskog dna do razine mirne vode. Uvijek je pozitivna vrijednost pa je na morskome dnu  $z = -h$ ,
- valni brijeg je najviša točka vala,
- valni dol je najniža točka vala,
- valna amplituda  $\zeta_a$  je udaljenost od razine mirne vode do valnog brijega ili dola,
- valna visina  $H$  je udaljenost između najviše i najniže točke vala odnosno između valnog brijega i valnog dola. Za sinusoidne valove, valna visina je dvostruka veća od valne amplitude pa vrijedi

$$H = 2\zeta_a \quad (1)$$

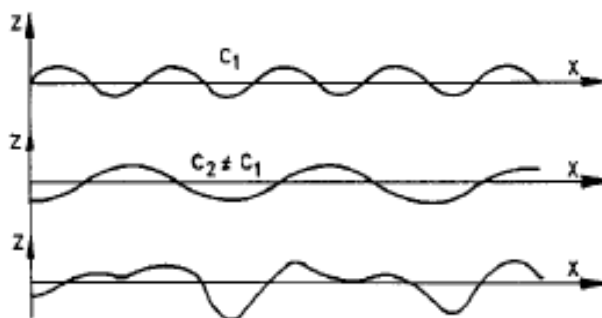
- valna duljina  $\lambda$  je horizontalna udaljenost između dvaju susjednih brjegov mjerena u smjeru napredovanja vala,
- valni period  $T$  je vremenski interval između dvaju susjednih brjegov,
- strmost vala  $\frac{H}{\lambda}$  je omjer visine vala i njegove duljine.



Slika 2.1. Pravilni val [5]

### 3.3. Princip superpozicije

Svaki je morski val moguće, polazeći od principa superpozicije, prikazati kao sumu harmonijskih valova različitih značajki. Na Slici 2.2. prikazan je profil morskog vala  $\zeta$  u određenom trenutku koji je nastao superpozicijom, odnosno zbrajanjem profila dvaju harmonijskih valova  $\zeta_1$  i  $\zeta_2$  u istom trenutku.



Slika 2.2. Superpozicija dvaju pravilnih valova [5]

Čak i za tako malen broj komponenata morskog vala (dvije) uočava se nepravilnost rezultirajućeg valnog profila. Kako su valovi  $\zeta_1$  i  $\zeta_2$  istog smjera, elevacija vala  $\zeta$  bit će u ovom slučaju konstantna u smjeru osi  $y$ . Superpozicijom više harmonijskih valnih komponenata različitih amplituda, frekvencije i smjera dobije se valna površina čija se nepravilnost očituje u svim smjerovima [4].

### 3.4. Njihanje broda na pravilnim valovima

Pri razmatranju njihanja broda na valovima polazi se od pretpostavke da je brod kruto tijelo. Drugim riječima, pretpostavlja se da elastični harmonijski pomaci trupa nemaju velikog utjecaja na njihanje broda. Prema tome dinamika krutog tijela i njihanje fluida nastaju kombiniranim djelovanjem različitih vanjskih sila i momenata kao i tromosti samog tijela. Sasvim je razumljivo da brod pri plovidbi ne nailazi na pravilne valove. Ako se to ponekad i dogodi, npr. pri prolasku valova mrtvog mora ili razizlaznih valova koji ostaju iza nekog drugog broda, previše je rijetko da bi zahtijevalo detaljniju analizu. Ipak, njihanje broda na pravilnim valovima spada u najvažnija poglavlja pomorstvenosti jer predstavlja jedan relativno jednostavan način određivanja njihanja broda kao i efekata tih njihanja [5].

#### 3.4.1. Koordinatni sustavi

Oscilacijsko gibanje ili njihanje broda, kao i svakog drugog krutog tijela, može se prikazati pomoću tri translacije težišta tijela i tri rotacije oko težišta. Da bi se opisalo djelovanje vala na brod te njegovo njihanje kao posljedicu tog djelovanja, potrebno je definirati odgovarajuće koordinatne sustave.

Nepomični koordinatni sustav (fiksni, inercijski)  $S(x_0, y_0, z_0)$  vezan je za Zemlju. Ravnina  $X_0Y_0$  leži na mirnoj slobodnoj površini, pozitivan smjer osi  $x_0$  je u smjeru napredovanja vala, a može biti i zakrenut u smjeru napredovanja broda. Os  $z_0$  usmjerena je vertikalno prema gore.

Koordinatni sustav broda  $G(x_b, y_b, z_b)$  vezan je za brod, a ishodište mu je u težištu broda  $G$ . Os  $x_b$  leži u smjeru uzdužne simetrale broda, a usmjerena je prema pramcu broda, odnosno u smjeru napredovanja. Os  $y_b$  usmjerena je prema lijevom boku broda, dok je os  $z_b$  okomita na ravninu  $X_bY_b$  s pozitivnim smjerom prema gore. U stanju mirovanja broda ravnina  $X_bY_b$  paralelna je s mirnom slobodnom površinom.

Translatirajući koordinatni sustav  $O(x,y,z)$  kreće se brzinom broda  $U$ . Ako brod miruje smjerovi osi koordinatnog sustava  $O(x,y,z)$  jednaki su onima kod koordinatnog sustava broda  $G(x_b,y_b,z_b)$ . Ravnina  $XY$  leži na mirnoj slobodnoj površini [4].

### 3.4.2. Susretni kut i susretna frekvencija

Frekvencija njihanja tijela koje napreduje na valovima najčešće nije jednaka frekvenciji valova. Osim o frekvenciji valova ona ovisi o brzini broda i kutu pod kojim brod nailazi na valove. Ako brod plovi u smjeru napredovanja valova period susretanja (susretni period)  $T_e$  će biti veći od perioda valova, odnosno frekvencija susretanja (susretna frekvencija) manja od frekvencije valova. Ako valovi dolaze s boka neće biti razlike između valne i susretne frekvencije. Kut pod kojim valovi nailaze na brod, tzv. susretni ili kursni kut  $\beta$  definira se kao kut koji zatvaraju vektor brzine broda i vektor brzine vala.

- valovi u krmu –  $\beta = 0^\circ$  do  $30^\circ$ ,
- valovi koso u krmu –  $\beta = 30^\circ$  do  $60^\circ$ ,
- bočni valovi –  $\beta = 60^\circ$  do  $120^\circ$ ,
- valovi koso u pramac –  $\beta = 120^\circ$  do  $150^\circ$ ,
- valovi u pramac –  $\beta = 150^\circ$  do  $180^\circ$  [4].

### 3.5. Difrakcijski i radijacijski valovi

Naišavši na tijelo koje je prethodno mirovalo, plutajući na slobodnoj površini mirne tekućine, ili uronjeno u njevoj neposrednoj blizini, nailazni val čiji je model predložen u obliku harmonijskog progresivnog vala, predaće dio svoje energije tijelu; dio energije će zajedno s valom nastaviti napredovanje iza tijela, dok će tijelo koje se počelo oscilacijski gibati, odnosno njihati, emitirati energiju koja se radijalno širi u svim horizontalnim smjerovima. Tijelu predana energija pretvorit će se u energiju njihanja i energiju njegove deformacije ako tijelo nije kruto.

Val je doživio promjenu koja se, osim u pojavi nove komponente, očituje i na smanjenju njegove visine, dok su period i frekvencija vala ostali nepromijenjeni. Ta se promjena naziva difrakcija ili lom. Pod pretpostavkom da su elastične deformacije tijela zanemarive, razlika energija nailaznog vala i njegova oblika nakon sudara s tijelom, u ravnoteži je s ostalim komponentama nastalim gibanjem tijela, a to su:

- energija inercijskih sila mase tijela
- energija uslijed rada povratnih sila nastalih pomakom tijela iz ravnotežnog položaja
- energija valova radijacije koji se šire od tijela [4].

Slika strujanja oko uronjenog dijela volumena tijela može se odrediti u dva koraka. U prvom koraku se opisuje model strujanja oko nepomičnog tijela koje nastaje uslijed nailazećeg vala  $\zeta_0(x, y, z; t)$  i njegove difrakcije. Takvo strujanje možemo opisati dvjema funkcijama: funkcijom potencijala brzine strujanja nailazećeg vala  $\Phi_0$  i funkcijom potencijala brzine strujanja njegove difrakcije  $\Phi_7$ .

$$\Phi(x, y, z; t) = \Phi_0(x, y, z; t) + \Phi_7(x, y, z; t) \quad (2)$$

Strujanje u difrakcijskoj komponenti vala mora zadovoljiti uvjete da se nalazi u idealnoj tekućini, da se radi o potencijalnom strujanju, da su zadovoljeni kinematički i dinamički uvjeti na slobodnoj površini te nepromočivost dna, ali mora zadovoljiti i dodatne uvjete kao što su rubni uvjeti na oplakanoj površini tijela  $S$  te uvjet radijacije u beskonačnosti.

Uvjet nepromočivosti oplakane površine  $S$  može se izraziti preko normalne komponente rezultirajuće brzine strujanja u točki te površine  $v_n$

$$v_n = \mathbf{n} \cdot \text{grad} \Phi = \frac{\partial \Phi}{\partial n} = 0 \quad (3)$$

Potencijal difrakcijske komponente prikazan je kao realni dio kompleksne funkcije:

$$\Phi_7 = \text{Re}[\zeta_a \Phi_7 e^{-i\omega t}] \quad (4)$$

U drugom koraku proučava se njihanje tijela u mirnoj tekućini, bez prisutnosti nailazećeg vala. Uvjet radijacije u beskonačnosti odnosi se na potencijal brzine difrakcijske komponente vala koji dovoljno daleko od tijela mora zadovoljiti uvjet radijacije.

U cijelom modelu koji opisuje njihanje tijela na valu posebnu ulogu ima energija radijacijskih valova koja se očituje kao:

- Stišavanje (prigušivanje) njihanja tijela
- Prividno povećanje mase tijela prilikom njihanja

Valovi radijacije nastaju na mirnoj vodi kao posljedica prisilnog oscilacijskog gibanja tijela pomacima amplitude na slobodnoj površini tekućine. Strujanje oko uronjenog dijela volumena tijela opisano je funkcijama brzine strujanja  $\Phi_j$  u nastalim valovima radijacije  $\zeta_j (j = 1 \dots 6)$ . Brzina strujanja je proporcionalna amplitudama njihanja, pripadne funkcije potencijala mogu se prikazati koristeći kompleksnu notaciju:

$$\Phi_j = \text{Re}[\delta_j \Phi_j e^{-i\omega t}], j = 1 \dots 6 \quad (5)$$

gdje su:

$\delta_j$  – kompleksne amplitude njihanja

$\Phi_j$  – kompleksna prostorna funkcija potencijala brzine strujanja.

$\Phi_j$  je određena realnom (kosinusnom)  $\Phi_{Cj}$  i imaginarnom (sinusnom)  $\Phi_{Sj}$  komponentom

$$\Phi_j(x, y, z) = \Phi_{Cj}(x, y, z) + \Phi_{Sj}(x, y, z) \quad (6)$$

Valovi radijacije moraju zadovoljiti uvjete radijacije u velikoj udaljenosti od tijela, a uslijed nepromočivosti oplakane površine  $S$  uronjena dijela potrebni je uvesti dodatni rubni uvjet za brzinu strujanja u valu radijacije. Ne postoji strujanje kroz oplakanu površinu pa normalna komponenta brzine čestice tekućine mora biti jednaka normalnoj komponenti brzine dodirne točke  $P(x_p, y_p, z_p)$  oplakane površine  $S$  [4].

### 3.6. Tlakovi i sile na oplakanoj površini

Sila  $F$  i moment  $M$ , kojom tekućina djeluje na tijelo u valu, posljedica je tlakova  $p$  na oplakanoj površini  $S$  uronjena volumena tijela. Koristeći linearizirani oblik Bernoullieve jednačbe za hidrodinamički tlak u potencijalnom strujanju, tlak  $p$  može se izraziti pomoću funkcije potencijala brzine strujanja  $\Phi(x, y, z; t)$

$$p = -\rho \frac{\partial}{\partial t} \Phi(x, y, z; t) + \rho g z \quad (7)$$

Konačan izraz za tlak glasi:

$$p(x, y, z; t) = \rho g z + \operatorname{Re}\{-i\omega\rho(\zeta_a(\phi_0(x, y, z) + \phi_7(x, y, z)) + \sum_{j=1}^6 \delta_j \phi_j(x, y, z))e^{-i\omega t}\} \quad (8)$$

Integracijom tlaka po oplakanoj površini  $S$  dobiva se ukupna sila

$$\mathbf{F} = - \iint_S \mathbf{n} p dS \quad (9)$$

i moment

$$\mathbf{M} = - \iint_S \mathbf{r} \times \mathbf{n} p dS \quad (10)$$

koji nastaju u interaktivnom djelovanju vala i tijela. Pojedine komponente te sile i momenta mogu se definirati prema valnim komponentama, kao:

- uzbudna sila:

$$\mathbf{F}_U = \operatorname{Re}\{i\omega\rho\zeta_a \iint_S (\phi_0(x, y, z) + \phi_7(x, y, z)) \mathbf{n} dS e^{-i\omega t}\} \quad (11)$$

- hidrodinamička reakcija:

$$\mathbf{F}_H = \operatorname{Re}\{i\omega\rho \sum_{j=1}^6 \eta_j \iint_S (\phi_j(x, y, z)) \mathbf{n} dS e^{-i\omega t}\} \quad (12)$$

- i povratna sila:

$$\mathbf{F}_K = -\rho g \iint_S \mathbf{z} \mathbf{n} dS \quad (13)$$

Na sličan se način mogu odrediti i uzbudna komponenta, komponenta hidrodinamičke reakcije i povratna komponenta ukupnog momenta

$$\mathbf{M}_U = \operatorname{Re}\{i\omega\rho\zeta_a \iint_S (\phi_0(x, y, z) + \phi_7(x, y, z)) \mathbf{r} \times \mathbf{n} dS e^{-i\omega t}\} \quad (14)$$

$$\mathbf{M}_H = \operatorname{Re}\{i\omega\rho \sum_{j=1}^6 \eta_j \iint_S (\phi_j(x, y, z)) \mathbf{r} \times \mathbf{n} dS e^{-i\omega t}\} \quad (15)$$



$$\mathbf{M}_K = -\rho g \iint_S z \mathbf{r} \times \mathbf{n} dS \quad (16)$$

Oplakana površina tijela po kojoj se integrira tlak tijekom njihanja mijenja oblik ovisno o amplitudama njihanja  $\eta_j(t)$ ,  $j = 1 \dots 6$

$$S(t) = S_0 + \delta S(t) \quad (17)$$

$S_0$  je oplakana površina tijela u mirovanju, dok je  $\delta S(t)$  njena varijacija uslijed njihanja tijela i valovite slobodne površine.

Nailazni val je opisan u inercijskom (nepomičnom) koordinatnom sustavu  $O(x_0, y_0, z_0)$ , dok su geometrija tijela i normala  $\mathbf{n}$  na oplakanu površinu  $S$  opisani u koordinatnom sustavu tijela  $O(x, y, z)$ . Iako tijelo ne napreduje ( $F_n=0$ ), položaj normale u odnosu na inercijski sustav  $O(x_0, y_0, z_0)$  mijenja se uslijed njegove rotacije prilikom njihanja, pa se normala na oplakanu površinu može definirati kao

$$\mathbf{n}(t) = \mathbf{n}_0 + \delta \mathbf{n}(t) \quad (18)$$

gdje je  $\mathbf{n}_0$  normala na tijelo u mirovanju, a  $\delta \mathbf{n}(t)$  je njena varijacija uslijed rotacijskih stupnjeva njihanja  $j=4,5,6$ . Da bi cijeli problem ostao linearan, nužno je zanemariti navedene varijacije kao male veličine drugog reda [4].

### 3.6.1. Valna uzbuda

Valna uzbudna sila i moment određuju se uz navedena pojednostavljenja iz jednačbi (11) i (14).

$$\mathbf{F}_U = Re \left\{ i\omega \rho \zeta_a \iint_{S_0} (\phi_0(x, y, z) + \phi_7(x, y, z)) \mathbf{n}_0 dS_0 e^{-i\omega t} \right\} \quad (19)$$

$$\mathbf{M}_U = Re \left\{ i\omega \rho \zeta_a \iint_{S_0} (\phi_0(x, y, z) + \phi_7(x, y, z)) \mathbf{r} \times \mathbf{n}_0 dS_0 e^{-i\omega t} \right\} \quad (20)$$

### 3.6.2 Hidrodinamička reakcija

Tijekom njihanja u mirnoj tekućini tijelo emitira valove radijacije koji iz sustava odnose energiju i na taj način smanjuju amplitude njihanja. Sile i momenti koje tom prilikom nastaju manifestiraju se kao hidrodinamička reakcija

$$\mathbf{F}_H = Re \left\{ i\omega \rho \sum_{j=1}^6 \delta_j \iint_{S_0} (\phi_j(x, y, z)) \mathbf{n}_0 dS_0 e^{-i\omega t} \right\} \quad (21)$$

$$\mathbf{M}_H = Re \left\{ i\omega \rho \sum_{j=1}^6 \delta_j \iint_{S_0} (\phi_j(x, y, z)) \mathbf{r} \times \mathbf{n}_0 dS_0 e^{-i\omega t} \right\} \quad (22)$$

### 3.6.3. Povratna sila

Povratna sila i moment koji djeluju na tijelo koje se njiše u tekućini slijede iz integracije hidrostatičke komponente tlaka u Bernoullievoj jednadžbi. Vertikalni pomak  $z$  točke  $P$  na oplakanoj površini sadrži stacionarni član, vrijednost koju ta točka ima u mirovanju i nestacionarni član, njenu varijaciju uslijed njihanja tijela

$$z = z_0 + \delta z(t) \quad (23)$$

$$\mathbf{F}_K = -\rho g \iint_{S_0} (z_0 + \delta z(t)) \mathbf{n}_0 dS_0 \quad (24)$$

$$\mathbf{M}_K = -\rho g \iint_{S_0} (z_0 + \delta z(t)) \mathbf{r} \times \mathbf{n}_0 dS_0 \quad (25)$$

Integracija prvog člana podintegralne funkcije rezultirat će statičkom silom i momentom uzgona. Kako je taj dio uravnotežen gravitacijskim opterećenjem, njegov će se utjecaj u ravnoteži njihanja u daljnjem razmatranju izostaviti. Konačan oblik povratne sile i momenta glasi [4]:

$$\mathbf{F}_K = -\rho g \iint_{S_0} \delta z(t) \mathbf{n}_0 dS_0 \quad (26)$$

$$\mathbf{M}_K = -\rho g \iint_{S_0} \delta z(t) \mathbf{r} \times \mathbf{n}_0 dS_0 \quad (27)$$

## 4. PROGRAMSKI PAKET LS-DYNA

### 4.1. Općenito o LS-DYNA-i

LS-DYNA je napredni softverski paket za simulaciju fizikalnih zakonitosti. Razvijena je od LSTC-a (*Livermore Software Technology Corporation*) i sve više se razvija i daje veće mogućnosti za rješavanje mnogih kompleksnih problema. Omogućuje analizu nelinearne dinamike sustava metodom konačnih elemenata, koristeći eksplicitnu vremensku integraciju. LS\_DYNA se tako koristi u autoindustriji, industriji koja se bavi proučavanjem svemirskih letjelica, konstrukciji, vojsci, u procesima proizvodnje i biotehnici [6].

LS-DYNA se razvila od 3D programa za konačne elemente DYNA3D, koju je razvio Dr. John O. Hallquist at LLNL (*Lawrence Livermore National Laboratory*) u 1976. godini. DYNA3D je bila napravljena sa idejom da simulira udare fuzije atomske bombe pri niskim amplitudama i brzine sudara od 40 m/s. Iako je na kraju taj projekt prekinut, DYNA3D se nastavila razvijati. Program je u to vrijeme bio dosta jednostavan, najviše zbog računala koja su u to vrijeme postojala. 1979. godine je puštena u pogon nova verzija DYNA3D. U 1981. godini su još više razvili program pa su sada uveli još devet dodatnih materijala koji su onda omogućavali nove simulacije. 1982. godine dolazi do razvijanja bržih algoritama, tako da je brzina svih proračuna smanjena za 10%. U 1988. godini DYNA3D mijenja ime u LS-DYNA3D, a kasnije i u skraćeni oblik LS-DYNA [6].

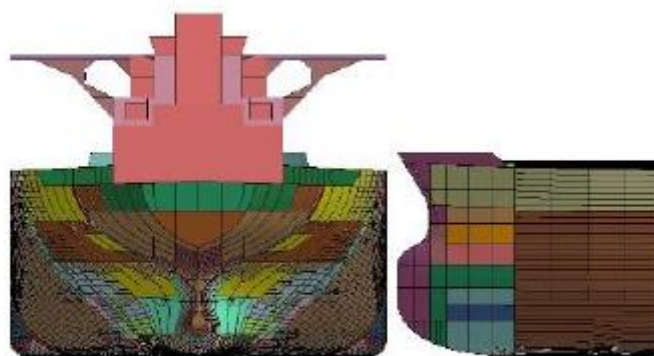


Slika 4.1. Primjena LS-DYNA-e

Glavna metodologija rješavanja nelinearnih dinamičkih problema temelji se na eksplicitnoj vremenskoj integraciji. Implicitni rješavač (*eng. solver*) je također dostupan, uključujući strukturnu analizu i prijenos topline, no uz određena ograničenja. Kontaktno – udarni algoritam omogućava jednostavno rješavanje zahtjevnih problema te omogućava analizu prijenosa topline duž kontaktnih površina [7].

Diskretizacija strukture omogućena je postojanjem velikog broja vrsta konačnih elemenata: tetraedara sa četiri čvora i solid elemenata sa osam čvorova, grednih elemenata s dva čvora, tro i četvero – čvornih ljuskastih elemenata, solid ljuskastih elemenata sa osam čvorova, štapnih i membranskih elemenata, diskretnih elemenata i krutih tijela. Za svaku vrstu elementa dostupan je i određeni broj numeričkih formulacija [7].

Specijalizirane mogućnosti simulacije i analize zračnih jastuka, senzora i sigurnosnih pojaseva učinile su LS-DYNA-u važnim alatom u automobilskoj industriji. Prilagođeno umrežavanje dostupno za ljuskaste elemente je često korišteno u obradi materijala deformiranjem. LS-DYNA trenutno sadrži približno stotinu konstitutivnih modela i deset jednadžbi stanja kojima pokriva širok spektar materijala i njihovog ponašanja. LS-DYNA se koristi na velikom broju super računala, radnih stanica i osobnih računala, a pojavom pristupačnijih višeprocorskih sustava njena primjena postala je sve češća [7].



Slika 4.2. Primjena LS-DYNA-e u analizi sudara brodova [8]

Kada kažemo nelinearni problem, onda tu podrazumijevamo da su barem jedan ili svi navedeni slučajevi prisutni:

1. Promjena rubnih uvjeta (npr. Kontakt između dijelova koji se mijenja cijelo vrijeme)
2. Velike deformacije (npr. raspadanje metalnih dijelova)
3. Nelinearni materijali koji se ponašaju kao idealno elastični materijali [6]

LS-DYNA se sastoji od jedne izvršne datoteke preko koje se pristupa svim opcijama aplikacije. Problemi su zadani u potpunosti tekstualno i zapisuju se u jednostavnom ASCII formatu koji može biti mijenjan u bilo kojoj aplikaciji za uređivanje teksta. Svaka opcija prisutna u LS-DYNA-i ima svoju ključnu riječ, (*eng. keyword*) preko čijih parametara se opisuje numerički model i postupak analize. Osim tekstualnog zadavanja, svi parametri analize mogu se postavljati i pomoću LSTC-ovog pre/postprocesora LS PrePost. LS PrePost je napredan alat za uređivanje modela prije i pregledavanje rezultata nakon analize. Iako dolazi zajedno u paketu, nije vezan uz LS-DYNA rješavač nego je dostupan i zasebno te za njega nije potrebna licenca. Grafičko sučelje je (pogotovo u novijim verzijama) pregledno i intuitivno i čini rad znatno bržim i lakšim naspram starog tekstualnog sučelja. Nove grafičke mogućnosti čine LS-DYNA-u još moćnijom aplikacijom koja pruža cjelovito rješenje za pripremu geometrijskih modela, mreže konačnih elemenata, numeričke izračune i analize rezultata simulacija [7].

## 4.2. LS-DYNA/MCOL

MCOL je programski alat unutar LS-DYNA-e koji računa vanjsku dinamiku brodova u sudaru, uzimajući u obzir hidrodinamičke sile koje djeluju na oba broda.

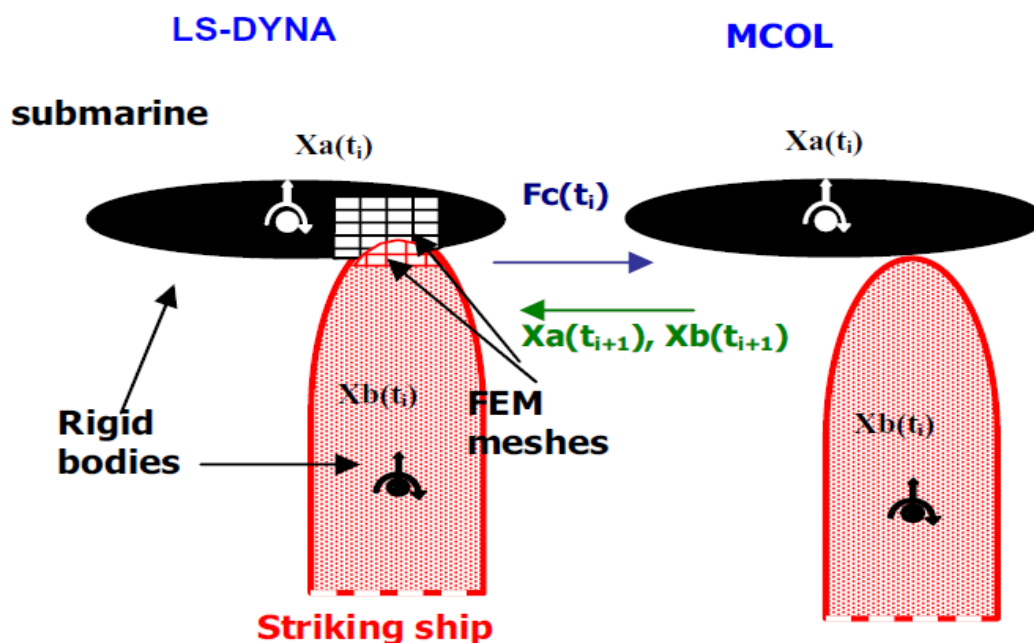
Mehaniku sudara brodova opisao je Pederson 1995. godine koja se može podijeliti na unutarnju mehaniku i vanjsku dinamiku. Unutarnja mehanika sudara se odnosi na probleme izvijanja, popuštanja i puknuća materijala i dijelova. Vanjska dinamika sudara tj. gibanja dvaju brodova u sudaru koji se smatraju krutim tijelima pod djelovanjem sila sudara i hidrodinamičkih tlačnih sila, određuju se pomoću programa MCOL ugrađenog unutar programskog paketa LS-DYNA.

Princip rada LS-DYNA/MCOL

U osnovi postupak se sastoji od tri glavna koraka:

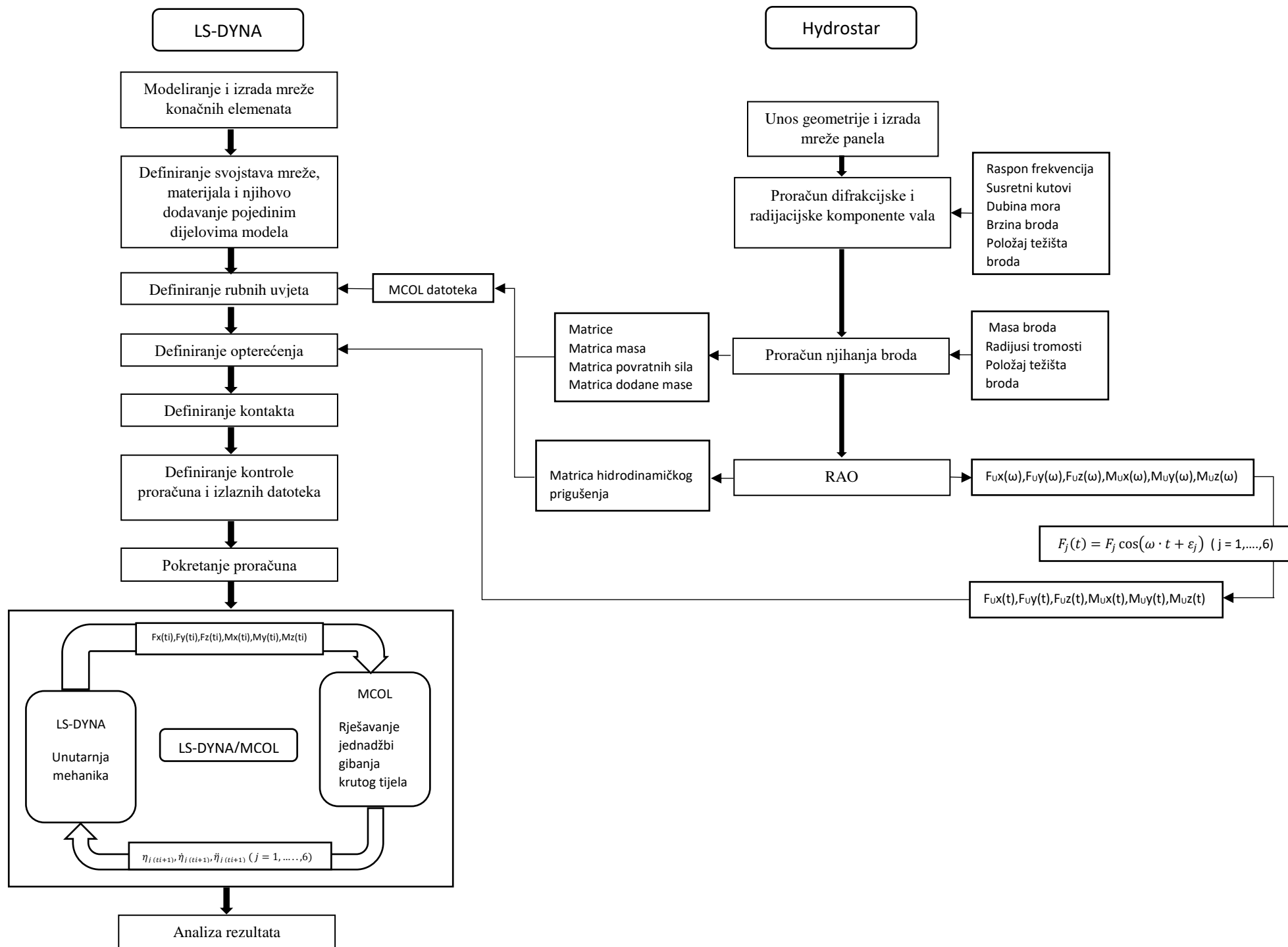
- izrada mreže konačnih elemenata koristeći neki od programa
- provođenje proračuna
- analiza rezultata pomoću LS-PrePost programa

Model analize sudara dvaju brodova prikazan je na slici 4.3. Mreža konačnih elemenata gradi se samo u području sudara, preostala struktura se modelira kao kruto tijelo opisano njegovim momentima tromosti masa i položajem težišta masa. Prema slici LS-DYNA u MCOL šalje resultantne sile i momente u težištu brodova za trenutak  $t_i$  ( $F_c(t_i)$ ). MCOL rješava jednadžbe gibanja i određuje nove položaje brodova ( $x_a(t_{i+1})$ ,  $x_b(t_{i+1})$ ) za trenutak  $t_{i+1}$ , te ih vraća u LS-DYNA-u.



Slika 4.3. Princip rada LS-DYNA/MCOL [9]

Postupak provedbe cijelog procesa proračuna prikazan je na slijedećem dijagramu toka:



U prvom koraku potrebno je odrediti hidrodinamičke značajke broda za što je korišten programski paket HydroSTAR. Postupak provedbe proračuna u HydroSTAR-u opisan je u sljedećem poglavlju. Nakon provedenog proračuna dobivenim matricama mase, povratnih sila, dodane mase i hidrodinamičkog prigušenja gradi se MCOL datoteka. Za određeni raspon frekvencija i susretnih kutova nailaznih valova HydroSTAR računa komponente uzbudnih sila i momenata u težištu broda. Dobivene sile i momente koji su u frekvencijskoj domeni se pomoću izraza:

$$F_j(t) = F_j \cos(\omega \cdot t + \varepsilon_j) \quad (j = 1, \dots, 6) \quad (28)$$

prebacuju u vremensku domenu i kao takve se unose u LS-DYNA-u.

Nakon definiranja svih parametara proračuna pokreće se udruženi LS-DYNA/MCOL proračun. LS-DYNA određuje ukupne sile i momente u težištu broda za trenutak  $t_i$ , zatim ih šalje u MCOL koji određuje položaj, brzinu i ubrzanje broda u trenutku  $t_{i+1}$  rješavajući jednadžbe gibanja. Novi položaj, brzinu i ubrzanje MCOL šalje u LS-DYNA-u koja ponovo određuje ukupne sile i momente za trenutak  $t_{i+1}$ . Ovaj postupak se ponavlja sve dok istekne definirano vrijeme trajanja proračuna. Ako se radi o analizi sudara dvaju brodova proračun će trajati sve dok brzina brodova koji sudjeluju u sudaru ne postane jednaka. U tom trenutku više nema prodora brodova jedan u drugi te nema potrebe za daljnjim proračunom.

## 5. PRORAČUN ODZIVA BRODA U HydroSTAR-u

Proračun odziva proveden je za balastno stanje krcanja. Osnovne dimenzije broda i osnovni podaci za brod u balastu dani su tablici 5.1. i tablici 5.2.

Tablica 5.1. Osnovne dimenzije LPG broda, 6500 m<sup>2</sup>

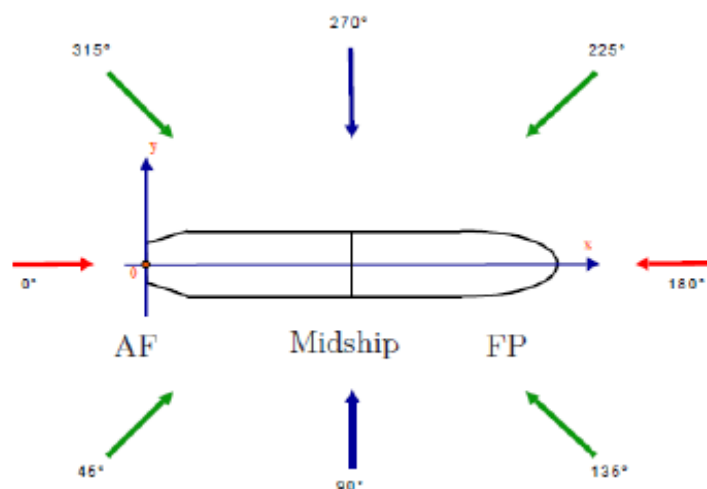
Dužina preko svega [m]	114.89
Dužina između okomica [m]	109.211
Širina [m]	16.80
Visina do glavne palube [m]	11.825
Projektni gaz [m]	7.60
Brzina broda [čv]	16

Tablica 5.2. Osnovni podaci za brod u balastu

Masa praznog broda [t]	3607
Masa tereta [t]	2148.6
Istisnina [t]	5755.6
Gaz na krmi [m]	4.85
Gaz na pramcu [m]	4.59
Srednji gaz [m]	4.71
Položaj težišta broda po visini [m]	4.31
Položaj težišta broda po duljini [m]	63.74

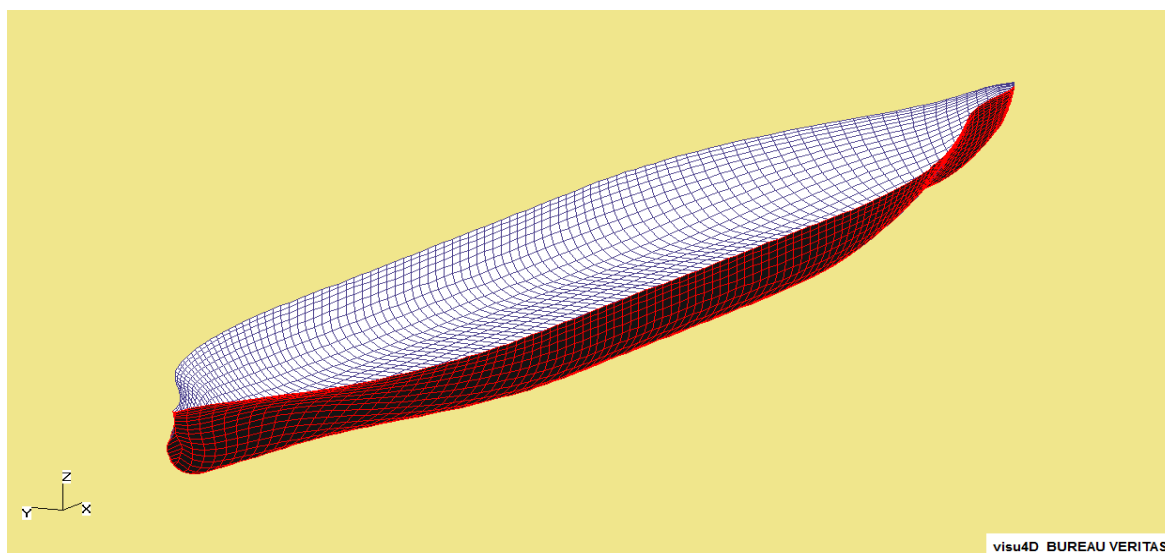
### 5.1. Princip rada programa HydroSTAR

Program HydroSTAR temelji se na panelnoj metodi i potencijalnoj teoriji. Forma je definirana koordinatama rebara, gazom, trimom. Definiraju se masa istisnine, položaj težišta, mase te radijusi tromosti mase oko težišta. Nakon unosa podataka, program formira trup pomoću panela.



Slika 5.1. Susretni kutovi



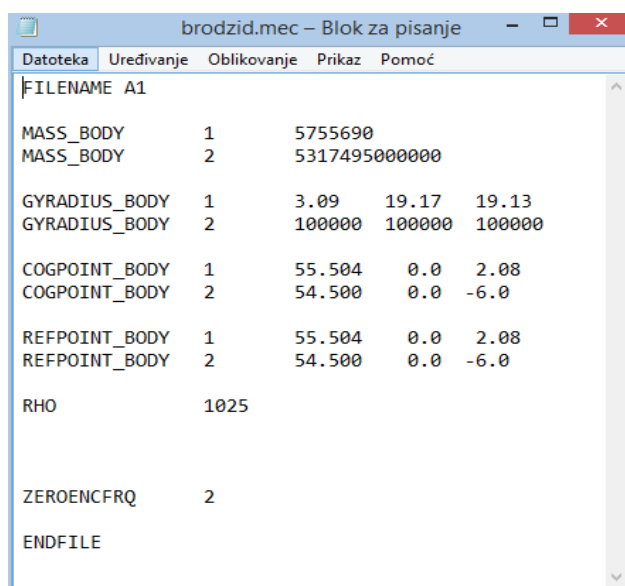


Slika 5.2. Generirana mreža panela

## 5.2. Postupak provedbe proračuna

Pokretanje proračuna u HydroSTAR-u sastoji se od nekoliko koraka. Za definiranje mreže panela potrebno je pripremiti dvije ulazne datoteke. Prva ulazna datoteka (*.mri*) treba sadržavati nekoliko informacija o brodu (tip krme i pramca, gaz i trim broda, broj panela po duljini i po poprečnom presjeku itd.). Svaka informacija definira se ključnom riječi. Druga ulazna datoteka (*.hul*) sadrži koordinate rebara broda. Za pripremu *.hul* datoteke trebalo je očitati koordinate rebara zadane forme. Zadana forma broda bila je u *.dwg* formatu koji je prebačen u programski paket Maxsurf, gdje su očitane koordinate točaka rebara. Zbog složenosti forme pramca i krme uzeti su manji razmaci rebara, dok je u području paralelnog srednjaka razmak rebara bio veći. Forma je podijeljena sa ukupno 87 rebara. Koordinate zida zbog jednostavnosti geometrije definirane su direktno u *.hul* datoteci. Duljina zida bila je 210 m, širina 2 m, dok je visina bila 12 m kao i odabrana dubina mora. Razmak između zida i boka broda je bio 1 m.

U ovom proračunu trebalo je uzeti utjecaj zida pristaništa. Budući da program HydroSTAR ne sadrži mogućnost uzimanja u obzir utjecaja zida pristaništa, trebalo je iskoristiti mogućnost analize međudjelovanja dvaju tijela. Postupak generiranja mreže panela broda i zida trebalo je napraviti posebno za svako tijelo. Nakon generiranja *.hst* datoteke za jedno i za drugo tijelo, trebalo je od ove dvije datoteke pripremiti jednu zajedničku *.hst* datoteku. U zajedničkoj *.hst* datoteci uz koordinate čvorova panela trebalo je još definirati međusobni položaj zida i broda. Nakon generiranja mreže panela trebalo je pripremiti ulaznu datoteku za proračun radijacijskog prigušenja, uzbudnih sila i momenata, dodane mase. Ulazna datoteka (*.rdf*) treba sadržavati raspon frekvencija valova, susretne kutove valova, brzini broda, dubinu mora. Unosom ove datoteke pokreće se proračun. Završetkom ovoga proračuna slijedi određivanje gibanja broda rješavanjem jednadžbe gibanja. Za to je potrebno pripremiti datoteku *.mec*, u kojoj treba za brod i zid definirati masu, položaj težišta broda, radijuse momenata tromosti mase. U ovoj datoteci za zid su definirani nerealno veliki radijusi momenata tromosti mase i masa zida kako bi se spriječio odziv zida. Unosom datoteke pokreće se proračun.



Slika 5.3. Definiranje .mec datoteke

## 6. PRORAČUN OPTEREĆENJA PRIVEZNIH LINIJA

Ovo poglavlje opisuje postupak projektiranja priveznog sustava broda prema pravilima američke mornarice (*DDS 582-1, Calculations for mooring systems*) [10]. Pretpostavlja se da je brod bočno privezan, a sile vjetra i morskih struja imaju ustaljeno djelovanje, tj. konstantnog su iznosa. Oprema za privezivanje projektira se za dva vremenska stanja:

1. Normalni vremenski uvjeti – brzina vjetra od 25 čv i morske struje od 1 čv, koje djeluju istodobno pod pravim kutom na simetralnu ravninu broda nastojeći gurnuti brod od pristaništa.
2. Teški vremenski uvjeti – brzina vjetra od 50 čv i morske struje od 3 čv, koje djeluju istodobno pod pravim kutom na simetralnu ravninu broda nastojeći gurnuti brod od pristaništa.

Za određivanje najtežeg slučaja opterećenja na brod, proračun treba provesti za dva stanja krcanja, i to za laki brod i za potpuno nakrcan brod.

Dozvoljena sila razvlačenja u priveznim linijama definirana je koeficijentima sigurnosti koji ne bi trebali biti manji od:

$FS = 9.0$  za projektno opterećenje

$FS = 3.0$  za granična opterećenja.

Dinamička opterećenja kao što su opterećenja od valova, udari vjetra, utjecaj prolazećeg broda se ne razmatraju u ovim pravilima, nego je njihov utjecaj pokriven velikim koeficijentom sigurnosti [10].

### 6.1. Sile vjetra

Veličina sile vjetra na brod ovisi o brzini vjetra i projiciranoj površini broda izloženoj vjetru. Općenito najveća sila vjetra na brod javlja se onda kada je brod na lakoj vodnoj liniji, a vjetar puše okomito na simetralnu ravninu broda.

Uzdužna i poprečna komponenta sile vjetra i moment zaošijanja oko težišta broda određuju se slijedećim izrazima:

$$F_{xw} = \frac{1}{2} \cdot C_{xw} \cdot \rho_w \cdot v_w^2 \cdot A_e \quad (29)$$

$$F_{yw} = \frac{1}{2} \cdot C_{yw} \cdot \rho_w \cdot v_w^2 \cdot A_s \quad (30)$$

$$M_w = \frac{1}{2} \cdot C_{xyw} \cdot \rho_w \cdot v_w^2 \cdot A_s \cdot L_{WL} \quad (31)$$

gdje je:

$F_{xw}$  – sila vjetra u uzdužnom smjeru [N],

$F_{yw}$  – sila vjetra u poprečnom smjeru [N],

$M_w$  – moment zaošijanja [Nm],

$\rho_w$  – gustoća zraka [ $\text{kg/m}^3$ ],

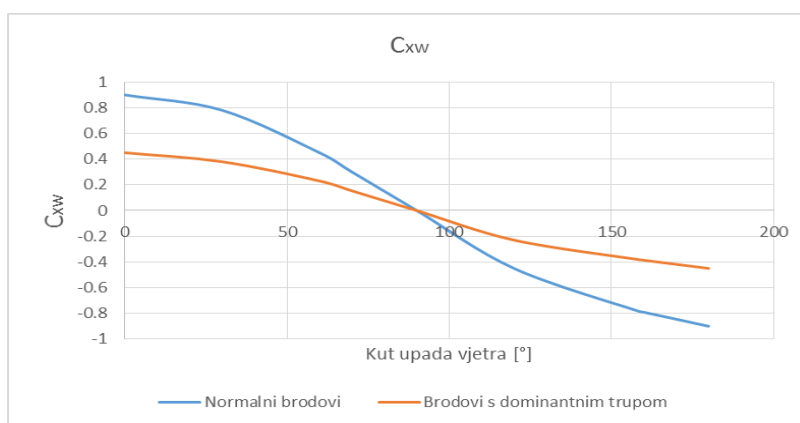
$v_w$  – brzina vjetra [m/s],

$A_e$  – projicirana površina broda u uzdužnom smjeru [ $\text{m}^2$ ],

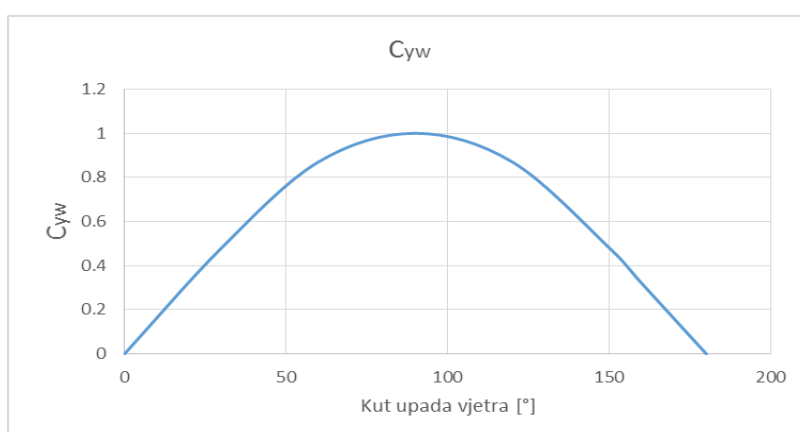
$A_s$  – projicirana površina broda u poprečnom smjeru [ $\text{m}^2$ ],

$L_{WL}$  – dužina vodne linije [m],

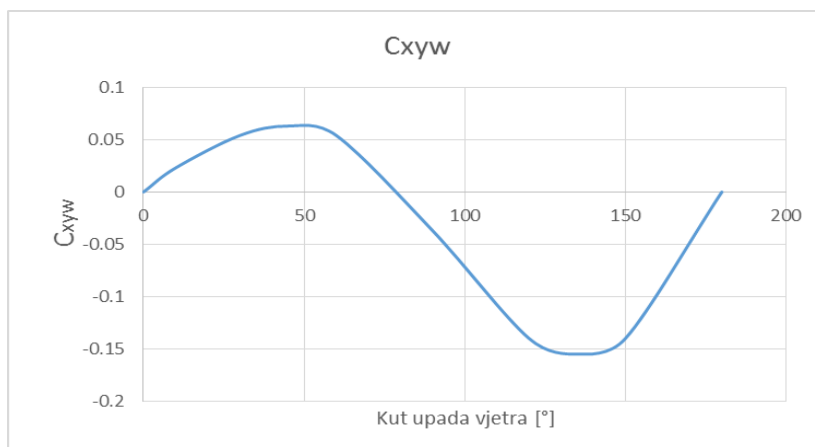
$C_{xw}$ ,  $C_{yw}$ ,  $C_{xyw}$  – koeficijenti otpora zraka tijela izloženog djelovanju vjetra, određuju se iz dijagrama i ovise o kutu upada vjetra [10].



Slika 6.1. Koeficijent  $C_{xw}$  u odnosu na kut upada vjetra [10]



Slika 6.2. Koeficijent  $C_{yw}$  u odnosu na kut upada vjetra [10]

Slika 6.3. Koeficijent  $C_{xyw}$  u odnosu na kut upada vjetra [10]

Područje planiranog LNG FSRU terminala Krk podložno je jakim i vrlo jakim vjetrovima iz sjevernih smjerova. Najjači vjetrovi pušu s kopna te neće izazivati valovlje, no mogu bitno utjecati na sigurnost broda tijekom boravka na pristanu, naročito tijekom manevra priveza i odveza [3].

Za vrijeme boravka na terminalu brod je postavljen u kursu  $225^\circ$ . Sile vjetra su određene za četiri smjera vjetra u odnosu na sjever i to:

- bura iz smjera NNE, kut upada vjetra na brod iznosi  $340^\circ$ ,
- jugo iz smjera SE, kut upada vjetra na brod iznosi  $135^\circ$ ,
- zapadni vjetar iz smjera WNW, kut upada vjetra na brod iznosi  $295^\circ$ ,
- lebić iz smjera SW, kut upada vjetra na brod iznosi  $225^\circ$ .

## 6.2. Sile morske struje

Morske struje, zajedno s vjetrom i valovima presudno utječu na kretanje broda bez poriva kao i na kretanje onečišćenja nakon izljeva ulja u more. Morske struje u Kvarneru i Riječkom zaljevu slijede tokove opće cirkulacije i ne prelaze vrijednost od 0.5 čvorova. U najvećem dijelu vremena teku u smjeru obrnutom od kazaljke na satu. Na mjestu priveza brzina struje po lijepom vremenu neće premašiti 0.5 čvorova dok ni za vrijeme najjačih vjetrova neće premašiti 1.5 čvora. Već na dubinama većim od 2 m one neće biti veće od 0.5 čvora [3].

Sile morske struje i moment zaošijanja određuju se prema slijedećim izrazima:

$$F_{xc} = \frac{1}{2} \cdot \rho_c \cdot v_c^2 \left( \frac{C_{xca} \cdot S \cdot B}{L_{WL}} + C_{xcb} \cdot A_b \right) \quad (32)$$

$$S = 2.588 \sqrt{L_{WL} \cdot \Delta} \quad (33)$$

$$C_{xcb} = C_{yc} \left( \frac{1 + \cos 4\theta_c}{2} \right) \quad (34)$$

$$F_{yc} = \frac{1}{2} \cdot C_{yc} \cdot \rho_c \cdot v_c^2 \cdot L_{WL} \cdot T \quad (35)$$

$$M_c = \frac{1}{2} \cdot C_{xyc} \cdot \rho_c \cdot v_c^2 \cdot L_{WL}^2 \cdot T \quad (36)$$

gdje je:

$F_{xc}$  – sila morske struje u uzdužnom smjeru [N],

$F_{yc}$  – sila morske struje u poprečnom smjeru [N],

$M_c$  – moment zaošijanja [Nm],

$\rho_c$  – gustoća morske vode [ $\text{kg/m}^3$ ],

$v_c$  – brzina morske struje [m/s],

$S$  – oplakana površina [ $\text{m}^2$ ],

$L_{WL}$  – dužina vodne linije [m],

$B$  – širina broda [m],

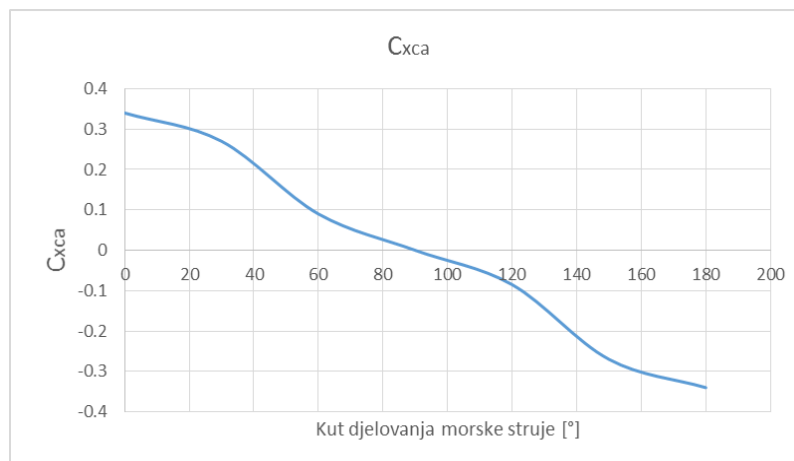
$\Delta$  – istisnina broda [t],

$T$  – gaz broda [m],

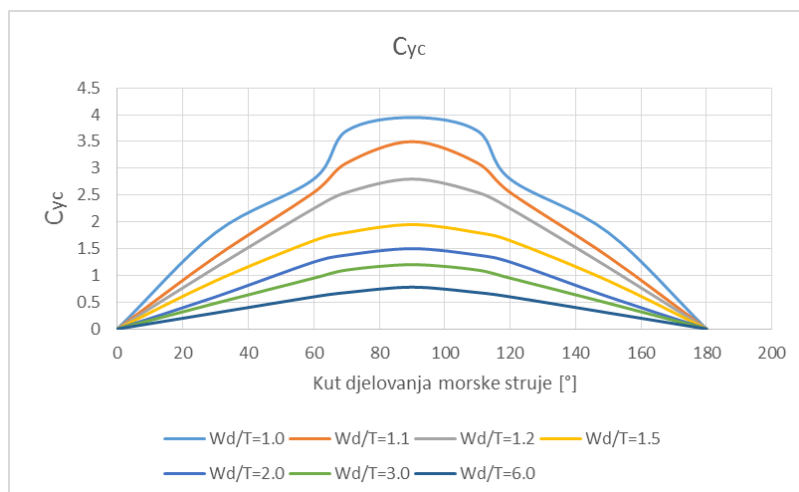
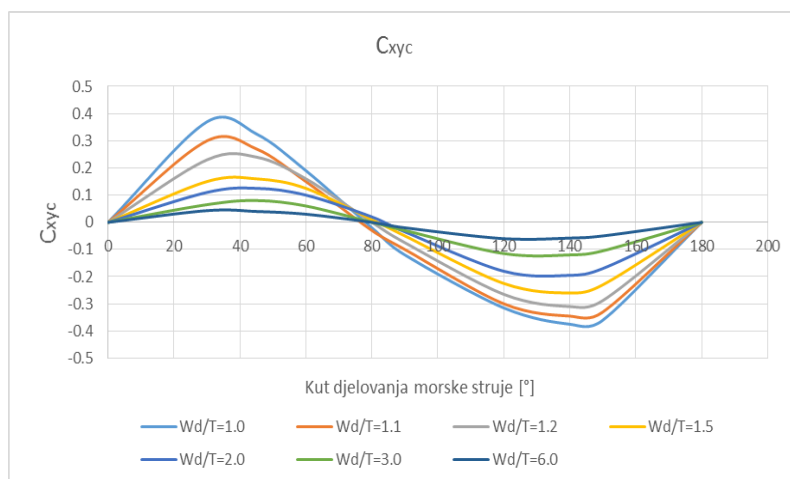
$A_b$  – projicirana površina podvodnog dijela broda u uzdužnom smjeru [ $\text{m}^2$ ],

$\vartheta_c$  – kut djelovanja morske struje [ $^\circ$ ],

$C_{xca}$ ,  $C_{yc}$ ,  $C_{xyc}$  – koeficijenti određeni iz dijagrama, ovise o kutu djelovanja morske struje [10].



Slika 6.4. Koeficijent  $C_{xca}$  u odnosu na kut djelovanja morske struje [10]

Slika 6.5. Koeficijent  $C_{yc}$  u odnosu na kut djelovanja morske struje [10]Slika 6.6. Koeficijent  $C_{xyc}$  u odnosu na kut djelovanja morske struje [10]

### 6.3. Rezultati proračuna sila vjetra i morske struje

U slijedećim tablicama dani su rezultati proračuna sila vjetra i morskih struja pri brzini vjetra od 25 čvorova, odnosno 13 m/s i brzini morske struje od 1 čvor za značajne smjerove vjetra i morskih struja i za određena stanja krcanja broda.

Tablica 6.1. Rezultati proračuna za brzinu vjetra od 25 čvorova

Stanje krcanja	Smjer vjetra [°]	$F_{xw}$ [kN]	$F_{yw}$ [kN]	$M_w$ [kNm]
<b>Laki brod</b>	340	-13.4	48.2	-1521.8
	135	0	150.7	-603.3
	295	5.3	137.6	385.9
	225	15.7	0	0
<b>Brod u balastu</b>	340	-12.1	42.6	-1348.2
	135	0	133.1	-534.4
	295	14.1	20.4	341.8
	225	14.1	0	0
<b>Potpuno nakrcan brod</b>	340	-10.6	32	-1028.3
	135	0	99.9	-407.6
	295	4.2	91.3	260.7
	225	24.7	0	0

Tablica 6.2. Rezultati proračuna za brzinu morske struje od 1 čvor

Stanje krcanja	Smjer morske struje [°]	$F_{xc}$ [kN]	$F_{yc}$ [kN]	$M_c$ [kNm]
<b>Laki brod</b>	340	-5.9	13.9	-329.6
	135	5.7	52.2	-141.2
	295	2.5	47.8	141.2
	225	10.9	0	0
<b>Brod u balastu</b>	340	-8.5	26.1	-805.1
	135	5.4	98.2	-248.6
	295	2.9	90.3	426.2
	225	13.7	0	0
<b>Potpuno nakrcan brod</b>	340	-7.7	64.3	-1813.1
	135	11.3	209.2	-591.2
	295	4.3	193.1	798.2
	225	18.1	0	0



U sljedećim tablicama dani su rezultati proračuna sila vjetra i morskih struja pri brzini vjetra od 50 čvorova, odnosno 25 m/s i brzini morske struje od 1.5 čvorova za značajne smjerove vjetra i morskih struja i za određena stanja krcanja broda.

Tablica 6.3. Rezultati proračuna za brzinu vjetra od 50 čvorova

Stanje krcanja	Smjer vjetra [°]	$F_{xw}$ [kN]	$F_{yw}$ [kN]	$M_w$ [kNm]
<b>Laki brod</b>	340	-49.8	178.3	-5628.2
	135	0	557.3	-2231.2
	295	19.9	509	1427.2
	225	58.1	0	0
<b>Brod u balastu</b>	340	-44.8	157.5	-4986
	135	0	492.3	-1976.6
	295	52.2	75.4	1264.3
	225	52.2	0	0
<b>Potpuno nakrcan brod</b>	340	-39.3	118.3	-3803
	135	0	369.7	-1507.7
	295	15.6	337.7	964.3
	225	91.6	0	0

Tablica 6.4. Rezultati proračuna za brzinu morske struje od 1.5 čvorova

Stanje krcanja	Smjer morske struje [°]	$F_{xc}$ [kN]	$F_{yc}$ [kN]	$M_c$ [kNm]
<b>Laki brod</b>	340	-15.1	35.6	-844
	135	14.8	133.7	-361.7
	295	6.4	122.5	361.7
	225	27.9	0	0
<b>Brod u balastu</b>	340	-22	67	-2061.1
	135	13.9	251.4	-636.5
	295	7.6	231.3	1091.2
	225	35.3	0	0
<b>Potpuno nakrcan brod</b>	340	-19.7	164.8	-4641.7
	135	29	535.6	-1513.6
	295	11.1	494.4	2043.4
	225	46.5	0	0

U sljedećim tablicama dani su rezultati proračuna sila vjetra i morskih struja pri brzini vjetra od 80 čvorova, odnosno 40 m/s i brzini morske struje od 1.5 čvorova za značajne smjerove vjetra i morskih struja i za određena stanja krcanja broda.

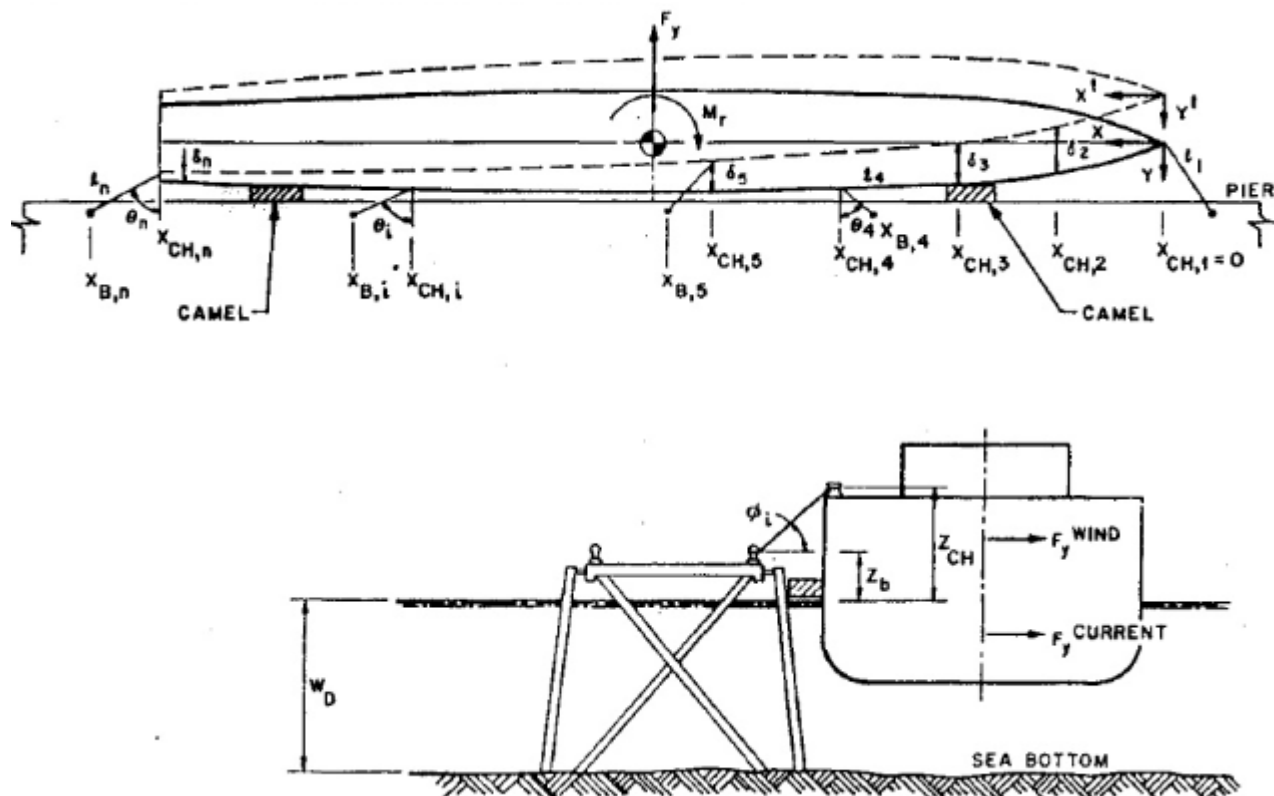
Tablica 6.5. Rezultati proračuna za brzinu vjetra od 80 čvorova

Stanje krcanja	Smjer vjetra [°]	$F_{xw}$ [kN]	$F_{yw}$ [kN]	$M_w$ [kNm]
<b>Laki brod</b>	340	-127.7	456.5	-14408.3
	135	0	1426.8	-5712
	295	50.6	1303.1	3653.7
	225	148.7	0	0
<b>Brod u balastu</b>	340	-114.8	403.3	-12764.2
	135	0	1260.5	-5060.2
	295	133.7	193.2	3236.8
	225	133.7	0	0
<b>Potpuno nakrcan brod</b>	340	-100.7	302.9	-9735.8
	135	0	946.6	-3859.7
	295	39.9	864.5	2468.8
	225	234.6	0	0

Tablica 6.6. Rezultati proračuna za brzinu morske struje od 1.5 čvorova

Stanje krcanja	Smjer morske struje [°]	$F_{xc}$ [kN]	$F_{yc}$ [kN]	$M_c$ [kNm]
<b>Laki brod</b>	340	-15.1	35.6	-844
	135	14.8	133.7	-361.7
	295	6.4	122.5	361.7
	225	27.9	0	0
<b>Brod u balastu</b>	340	-22	67	-2061.1
	135	13.9	251.4	-636.5
	295	7.6	231.3	1091.2
	225	35.3	0	0
<b>Potpuno nakrcan brod</b>	340	-19.7	164.8	-4641.7
	135	29	535.6	-1513.6
	295	11.1	494.4	2043.4
	225	46.5	0	0

#### 6.4. Proračun koeficijenta sigurnosti priveznih linija



Slika 6.7. Plan priveza – samo kao upute za definiranje parametara priveznih linija [10]

Tablica 6.7. Parametri koje treba definirati

No. linije	Položaj zjevača za vez [m]			Položaj bitvi na obali [m]			Duljina linije od vitla do zjevače[m]	Modul elastičnosti [GPa]	Broj konopa po liniji	Površina presjeka konopa [mm <sup>2</sup> ]	Min. prekidna čvrstoća [kN]
	$X_{ch}$	$Y_{ch}$	$Z_{ch}$	$X_B$	$Y_B$	$Z_B$					
1	113.3	7.5	4.4	121	16	3.79	3	3.792	2	5026	1491
2	109.2	8.5	4.4	89	16	3.79	3.5	3.792	1	5026	1491
3	10	7.3	7.4	24	16	3.79	5.5	3.792	1	5026	1491
4	2.5	3.8	7.4	-11	16	3.79	1.5	3.792	2	5026	1491

Položaje zjevača za vez i duljine linija od vitala određeni su prema općem planu sličnog brodu iz časopisa „Significant Ships“ iz 2006. godine. Radi se o brodu „GasChem Shinano“ [11]. Za privezne linije odabran je sintetički materijal najlon. Svojstva materijala preuzeta su iz [12]. U tablicama 6.8. i 6.9. je prikazan proračun koeficijenta sigurnosti priveznih linija za ukupnu silu i moment najgoreg slučaja. Ukupna sila i moment računaju se pomoću slijedećih izraza:

$$F_x = F_{xw} + F_{xc} \quad (37)$$

$$F_y = F_{yw} + F_{yc} \quad (38)$$

$$M_r = M_w + M_c - 0.48L_{WL}F_x \quad (39)$$

gdje je:

$F_x$  – ukupna sila u uzdužnom smjeru [N],

$F_y$  – ukupna sila u poprečnom smjeru [N],

$F_{xw}$  – sila vjetra u uzdužnom smjeru [N],

$F_{xc}$  – sila morske struje u uzdužnom smjeru [N],

$F_{yc}$  – sila morske struje u poprečnom smjeru [N],

$M_r$  – ukupni moment zaošijanja [Nm],

$M_w$  – moment zaošijanja uslijed sile vjetra [Nm],

$M_c$  – moment zaošijanja uslijed sile morske struje [Nm],

$L_{WL}$  – dužina vodne linije [m].

Tablica 6.8. Proračun koeficijenta sigurnosti

$l_i$ $= \sqrt{(X_{ch} + X_{bl})^2 + (Y_{ch} + Y_{bl})^2}$	$\Delta z_i$ $= Z_{ch} - Z_{bl}$	Površina presjeka privezne linije [mm <sup>2</sup> ]	Min. prekidna čvrstoća privezne linije[kN]	$\cos \theta_i$ $= \frac{Y_{bl} - Y_{ch}}{l_i}$	$\Phi_i$ $= \tan^{-1} \frac{\Delta z_i}{l_i}$	$\cos \Phi_i$
$l_i$ [m]	$\Delta z_i$ [m]	$a_i = n \cdot a$	MBS $= MBS_r \cdot n$	$\cos \theta_i$	$\Phi_i$	$\cos \Phi_i$
10.0767	0.61	10052	2982	0.645052	0.060462	0.998173
24.8171	0.61	5026	1491	0.221621	0.024575	0.999698
12.0370	3.61	5026	1491	0.556616	0.291372	0.957851
14.6386	3.61	10052	2982	0.696786	0.241783	0.970913

Komponenta sile privezne linije u y smjeru  $F_{yi}$ , sila razvlačenja privezne linije  $T_i$ , vrijednosti koeficijenta sigurnosti  $F_{si}$  proračunati su u tablici 6.9.

Tablica 6.9. Proračun koeficijenta sigurnosti

$L_i$ $= \frac{l_0 + l_1}{\cos \phi_i}$	$k_i = \frac{a_i E_i}{L_i}$	$k_{yi}$ $= k_i \cos \theta_i \cos \phi_i$	$k_{yi} X_{ch}$	$k_{yi} X_{ch}^2$	$F_{yi}$ $= k_{yi} (\delta_y + X_{ch} \gamma)$	$T_i$ $= \frac{F_{yi}}{\cos \theta_i \cos \phi_i}$	$F_{si}^{MBS}$ $= \frac{F_{si}}{T_i}$
$L_i$ [m]	$k_i$ [kN/m]	$k_{yi}$ [kN/m]	$k_{yi} \cdot X_{ch}$ [kN]	$k_{yi} \cdot X_{ch}^2$ [kNm]	$F_{yi}$ [kN]	$T_i$ [kN]	$F_{si}$
13.09	2910.78	1874.17	212344.3	2.73E+09	670.54	1041.42	2.86
28.32	672.86	149.07	16279.06	1.94E+08	53.33	240.73	6.19
18.06	1054.90	562.42	5624.25	562425.7	201.22	377.42	3.95
16.57	2299.37	1555.56	3888.91	24305.74	556.55	822.67	3.62

## 7. GUMENI ODBOJNICI

### 7.1. Osnovni princip rada odbojnika

Odbojnici u osnovi sprječavaju kontakt između broda i pristaništa, ili kontakt između dva broda. Odbojnik apsorbira određeni dio kinetičke energije broda i sprječava oštećenje brodske strukture i pristaništa. U slučaju upotrebe gumenih odbojnika koji su relativno mekani, glavni dio kinetičke energije se apsorbira elastičnom deformacijom odbojnika, a manji dio i elastičnom deformacijom broskog trupa. Prilikom proračuna kinetičke energije broda, pretpostavlja se da jedino odbojnik apsorbira kinetičku energiju. Kinetička energija koju odbojnici trebaju apsorbirati može se matematički izraziti:

$$E_f = f R_m d_m \quad (40)$$

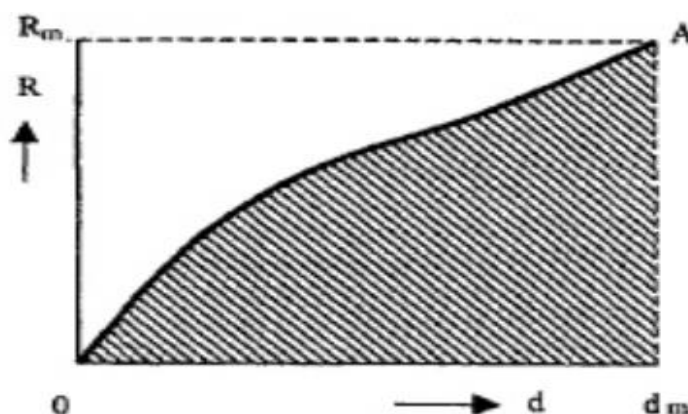
gdje je:

$E_f$  – kinetička energija broda koju odbojnici trebaju apsorbirati [kJ],

$f$  – koeficijent koji predstavlja učinkovitost odbojnika za apsorpiranje energije,

$R_m$  – sila reakcije odbojnika [kN],

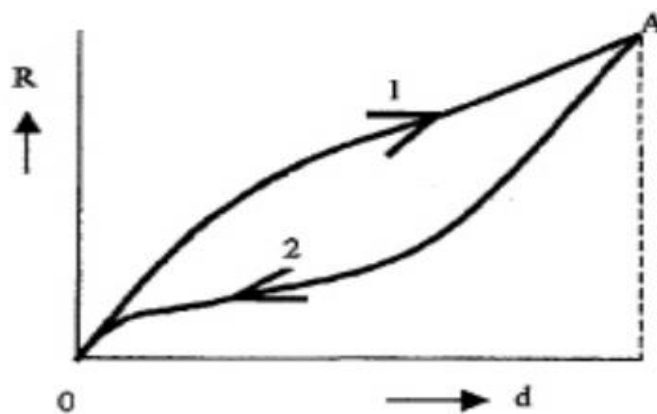
$d_m$  – deformacija odbojnika [m].



Slika 7.1. Apsorbirana energija odbojnika [13]

Koeficijent  $f$  ovisi o karakteristikama odbojnika tj. o odnosu između deformacije i sile reakcije. Zatamnjen dio ispod krivulje na slici 7.1. predstavlja apsorbiranu energiju, koeficijent  $f$  se dobije kada se površina ispod krivulje podijeli s površinom pravokutnika kojeg omeđuju vrhovi  $O$ ,  $R_m$ ,  $A$ ,  $d_m$ .

Energija koju apsorbira odbojnik djelom se predaje nazad brodu odguravajući ga od pristaništa, a dijelom se elastičnom deformacijom pretvara u toplinu. Prema slici 7.2. krivulja 1 predstavlja kompresiju odbojnika, dok krivulja 2 predstavlja dekompresiju. Površina između ove dvije krivulje predstavlja disipaciju energije u toplinu.



Slika 7.2. Kompresija odbojnika [13]

## 7.2. Odabir odbojnika

Sustav odbojnika treba odabrati tako da bude sposoban apsorbirati kinetičku energiju broda tijekom slijedećih režima korištenja:

1. pristajanje broda ( prvi kontakt broda i pristaništa),
2. privezani brod.

Pristajanje je proces prilaženja broda pristaništu, obično pod nekim kutom i određenom brzinom prilaženja. Brzina prilaženja je brzina okomita na pristanište. Početni udarac broda u pristanište mora se apsorbirati tako da ne dođe do oštećenja broda ili pristaništa.

Za vrijeme dok je brod privezan, može se napraviti razlika između operativnog režima tijekom kojeg je moguće vršiti prekrcaj broda i sigurnosnog režima tijekom kojeg je još moguće dopustiti da brod ostane privezan bez opasnosti od oštećenja broda ili pristaništa [13].

## 7.3. Određivanje energije pristajanja

Kinetička energija broda koji pristaje može se izračunati pomoću izraza:

$$E = \frac{1}{2} M v^2 \quad (41)$$

gdje je:

$E$  – kinetička energija broda [kJm],

$M$  – masa broda odnosno istisnina [t],

$v$  – brzina prilaženja broda okomita na pristanište [m/s].

Projektna energija koju odbojnik mora apsorbirati može se izračunati pomoću izraza:

$$Ed = \frac{1}{2} M v^2 C_e C_m C_s C_c \quad (42)$$

gdje je:

$Ed$  – projektna energija koju treba apsorbirati odbojnik [kJm],

$M$  – masa broda odnosno istisnina broda [t],

$v$  – brzina prilaženja broda okomito na pristanište [m/s],

$C_e$  – koeficijent ekscentriteta,

$C_m$  – koeficijent dodane mase,

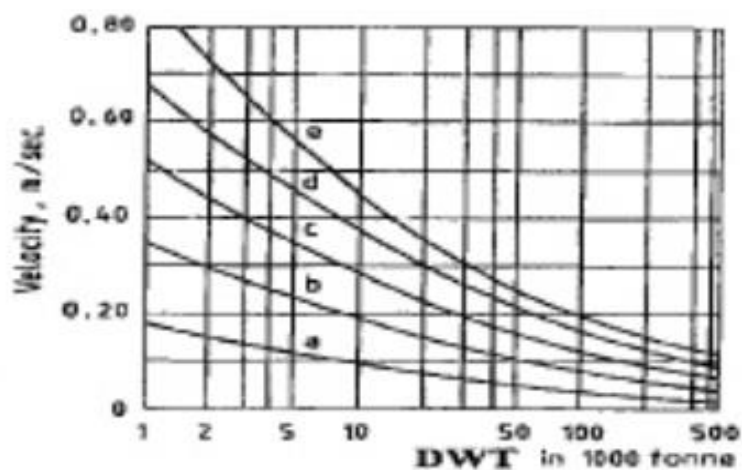
$C_s$  – koeficijent mekoće,

$C_c$  – koeficijent konfiguracije pristaništa.

Brzina prilaženja broda je najutjecajnija varijabla u proračunu energije pristajanja. Brzina prilaženja broda se definira kao brzina broda okomito na pristanište, u trenutku prvog kontakta broda i bokobrana. Brzina prilaženja ovisi o mnogo faktora kao što su:

- utjecaj valova, vjetra i morskih struja,
- tip broda,
- opremljenost pramčanim propulzorima,
- upotreba tegljača,
- veličina broda,
- tip tereta,
- ljudski faktor itd.

Brzinu prilaženja broda odredili smo iz dijagrama na slici 7.3. kao funkciju navigacijskih uvjeta i veličine broda [13].

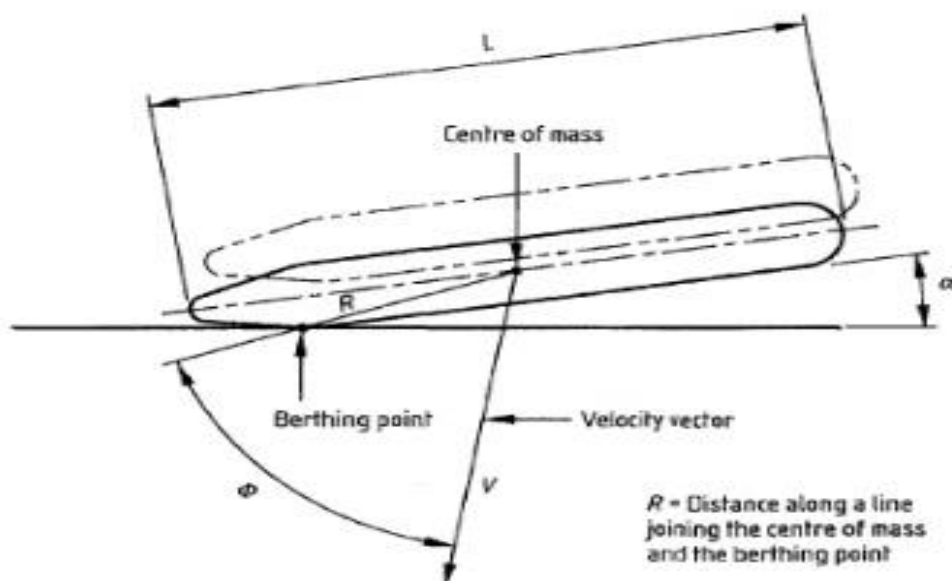


Slika 7.3. Određivanje brzine prilaženja [13]



7.3.1. Koeficijent ekscentriciteta  $C_e$ 

Za određivanje koeficijenta ekscentriciteta važnu ulogu ima kut  $\alpha$  pod kojim brod pristaje (slika 7.4).



Slika 7.4. Model prilaženja broda [13]

Mjerenja provedena u Japanu su pokazala da je za brodove veće od 50.000 DWT kut prilaženja obično manji od  $5^\circ$ . Za manje brodove, a posebno za brodove koji pristaju bez pomoći tegljača, kut prilaženja može biti između  $10 - 15^\circ$  [13].

Koeficijent ekscentriciteta se računa slijedećim izrazom:

$$C_e = \frac{K^2 + R^2 \cos^2 \varphi}{K^2 + R^2} \quad (43)$$

$$K = (0.19C_b + 0.11)L \quad (44)$$

$$C_b = \frac{M}{LBD\rho} \quad (45)$$

Ako pretpostavimo da je  $\varphi = 90^\circ$  onda slijedi:

$$C_e = \frac{K^2}{K^2 + R^2} \quad (46)$$

gdje je:

$K$  – radijus okretanja broda (ovisi o koeficijentu punoće) [m],

$R$  – horizontalna udaljenost od točke kontakta do težišta broda [m],

$\varphi$  – kut koji zatvara vektor brzine i dužina  $R$  [Slika],

$C_b$  – koeficijent punoće,

$M$  – masa broda [t],

$L$  – dužina broda [m],

$B$  – širina broda [m],

$D$  – gaz broda [m],

$\rho$  – gustoća vode [kg/m<sup>3</sup>].

### 6.3.2. Koeficijent dodane mase $C_m$

Općenito koeficijent dodane mase se definira kao:

$$C_m = \frac{M + M_v}{M} \quad (47)$$

gdje je:

$M$  – masa broda [t],

$M_v$  – dodana masa [t].

Za određivanje koeficijenta dodane mase koristi se nekoliko izraza (*Stelson, Shigeru, Vasco Costa*) [13]. Ovdje je iskorištena formula *Vasco Costa* koja vrijedi za slijedeće okolnosti:

- a) zračnost između kobilice i morskog dna mora biti veća od  $0.1D$ , gdje je  $D$  gaz broda,
- b) brzina pristajanja broda mora biti veća od 0.08 m/s.

$$C_M = 1 + \frac{2D}{B} \quad (48)$$

gdje je:

$D$  – gaz broda [m],

$B$  – širina broda [m].

### 7.3.3. Koeficijent mekoće $C_s$

Koeficijent mekoće je odnos između elastičnosti sustava odbojnika i brodskog trupa. Već je prije rečeno da se dio kinetičke energije apsorbira elastičnom deformacijom brodskog trupa. Za mekane odbojнике i manje brodove  $C_s$  se uzima 1.0, dok za tvrde odbojнике i veće brodove vrijednost koeficijenta  $C_s$  je između 0.9 i 1.0. Odabrana vrijednost koeficijenta  $C_s$  je 1.0.

#### 7.3.4. Koeficijent konfiguracije pristaništa $C_c$

Koeficijent konfiguracije pristaništa pokazuje razliku između otvorene i zatvorene strukture pristaništa. Prilikom približavanja broda zatvorenoj strukturi pristaništa odnosno zidu, zarobljena voda između broda i zida će djelovati kao jastuk i na taj način jedan dio energije će se izgubiti. Za zatvorenu strukturu pristaništa i kut prilazanja broda  $\alpha$  manji od  $5^\circ$  uzima se vrijednost koeficijenta 0.9, dok za kutove prilazanja veće od  $5^\circ$  efekt jastuka se ne pojavljuje pa je vrijednost koeficijenta 1.

#### 7.3.5. Koeficijent vršne energije udara

Sustav odbojnika osim projektne kinetičke energije mora moći apsorbirati i energiju koja prelazi vrijednost projektne. Neuobičajeno velika kinetička energija može nastati uslijed pogrešnog upravljanja brodom, kvarova, utjecaja vjetra i morskih struja. Prema uputama *PIANC-a* odabrana je vrijednost koeficijenta od 1.75 [13].

Tablica 7.1. Rezultati proračuna

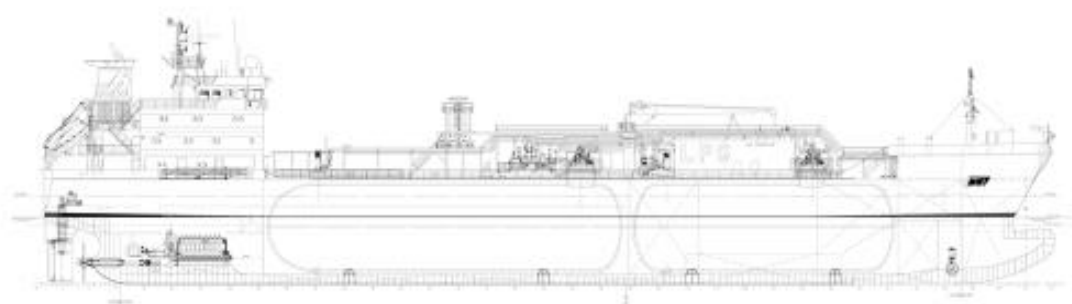
OSNOVNI PODACI O BRODU		
Istisnina [t]	DWT	10175.6
Dužina preko svega [m]	$L_{oa}$	114.89
Dužina između okomica [m]	$L_{pp}$	109.211
Širina [m]	B	16.8
Gaz [m]	D	7.6
Koeficijent punoće	$C_b$	0.711
PARAMETRI PRISTAJANJA BRODA		
Točka dodira od pramca [m]	x	16
Točka dodira od težišta [m]	R	35
Radijus rotacije [m]	K	26.78
Kut prilaza [ $^\circ$ ]	$\alpha$	10
Dubina ispod broda [m]		4.4
Brzina prilaza [m/s]	v	0.2
Koeficijent ekscentriciteta	$C_e$	0.443
Koeficijent dodane mase	$C_m$	1.904
Koeficijent mekoće	$C_s$	1.0
Koeficijent konfiguracije pristaništa	$C_c$	1.0
PRIVEZNE ENERGIJE		
Projektna energija [kNm]	$E_d$	140
Koeficijent vršne energije	$C_{ab}$	1.75
Vršna energija [kNm]	$E_{ab}$	245

Iz kataloga „*Fentek – Marine Fendering Systems*“ odabran je gumeni cilindrični odbojnik dimenzija 1600x800 mm, energije apsorpcije od 288 kNm [14].

## 8. OPIS NUMERIČKOG MODELA

### 8.1. Model broda

Za potrebe proračuna korišten je postojeći numerički model broda. Radi se o malom LPG brodu (*LPG Feeder Ship*) kapaciteta 6500 m<sup>3</sup>. Osnovni podaci o brodu dani su u tablici 8.1.

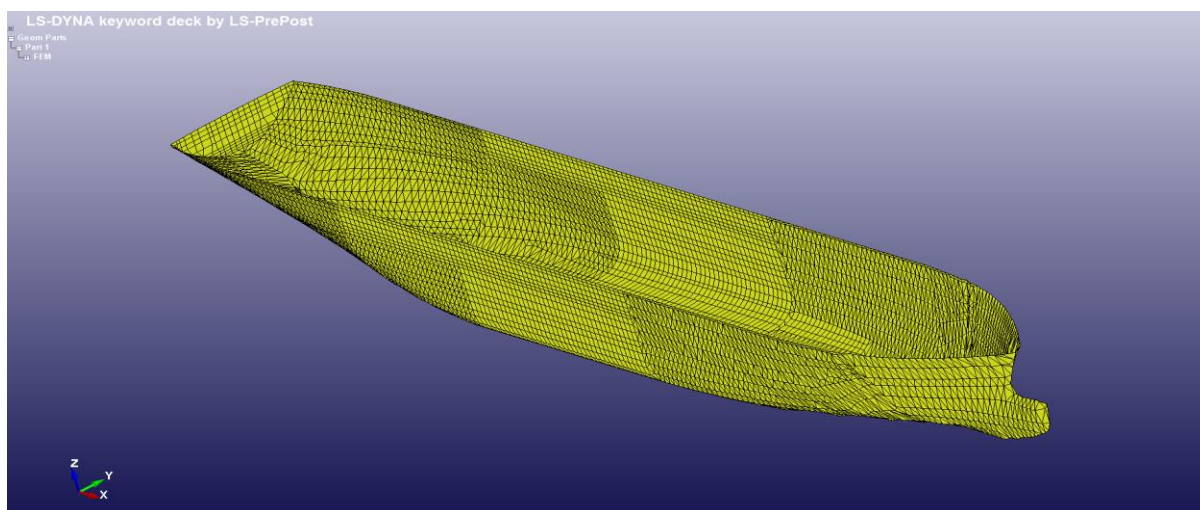


Slika 8.1. Opći plan LPG broda 6500 m<sup>3</sup>

Tablica 8.1. Osnovne dimenzije LPG broda

Dužina preko svega [m]	114.89
Dužina između okomica [m]	109.211
Širina [m]	16.80
Visina do glavne palube [m]	11.825
Projektni gaz [m]	7.60
Brzina broda [čv]	16

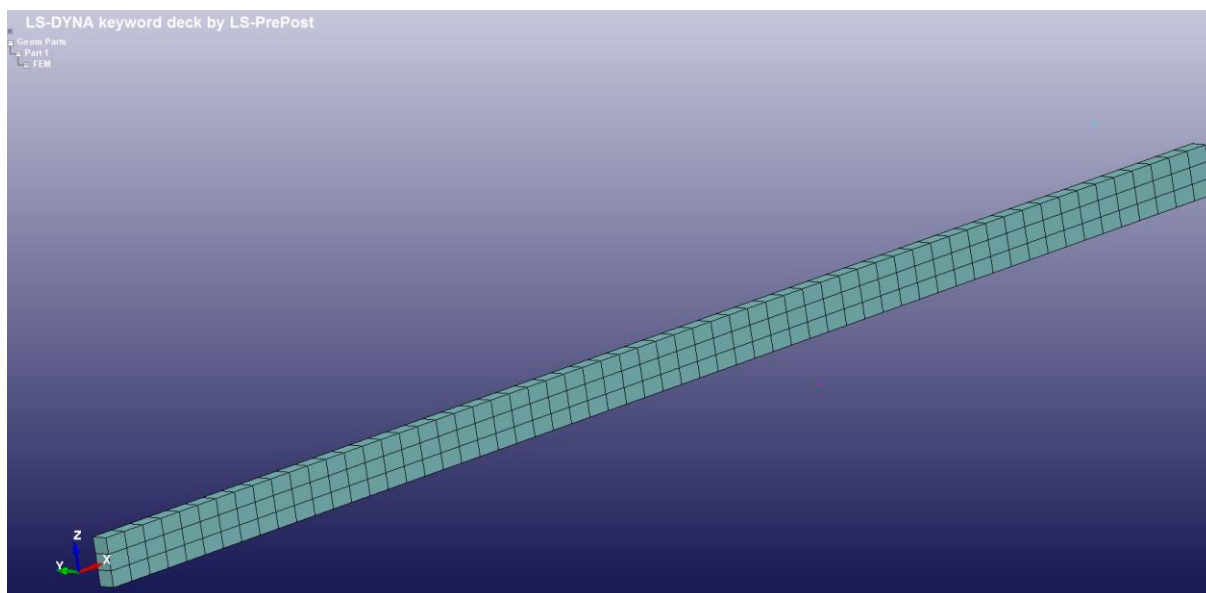
Brod je modeliran kao kruto tijelo, mrežu konačnih elemenata čine dvodimenzionalni elementi, a korišten je materijal beskonačne krutosti (\*MAT\_RIGID). U točki težišta broda definiran je jedan čvor koji predstavlja težište. Čvor je naredbom \*CONSTRAINED\_EXTRA\_NODE pridružen brodu kao krutom tijelu. U čvoru težišta se definiraju vanjska opterećenja.



Slika 8.2. Numerički model broda

## 8.2. Model pristaništa

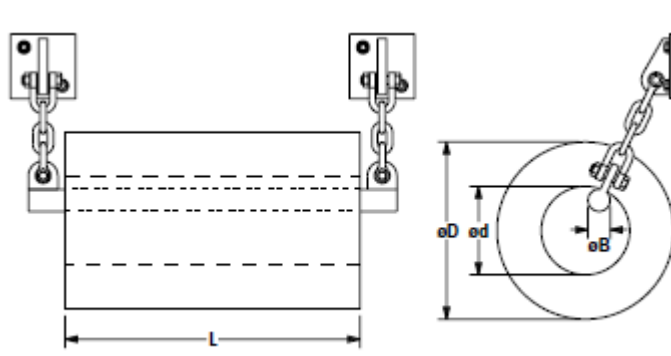
Dio betonskog zida pristaništa na kojem su postavljeni odbojnici predstavljen je jednostavnom geometrijom četverostrane prizme. Geometrija je modelirana trodimenzionalnim konačnim elementima veličine 1 m i korišten je materijalni model beskonačne krutosti 020-RIGID. Čvorovi na krajevima modela pristaništa su fiksirani.



Slika 8.3. Numerički model pristaništa

## 8.3. Model odbojnika

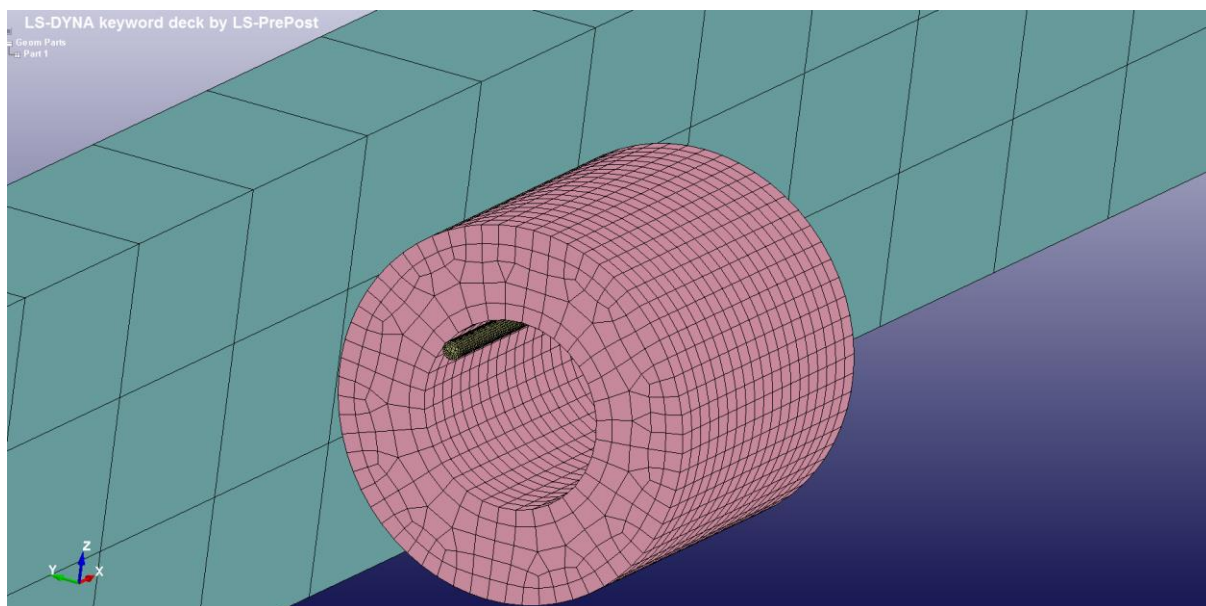
U analizi je korišten gumeni cilindrični odbojnik prvenstveno zbog jednostavnosti njegove geometrije. Gumeni cilindrični odbojnik obješen je na čeličnu šipku koja je lancima pričvršćena za zid pristaništa.



Slika 8.4. Gumeni cilindrični odbojnik [14]

Geometrija odbojnika i šipke modelirana je trodimenzionalnim konačnim elementima. Kao materijal odbojnika korišten je materijalni model 027-MOONEY\_RIVLIN pozivajući se na izvor [15], dok je šipka modelirana kao kruto tijelo, te je korišten materijal beskonačne krutosti 020-RIGID.

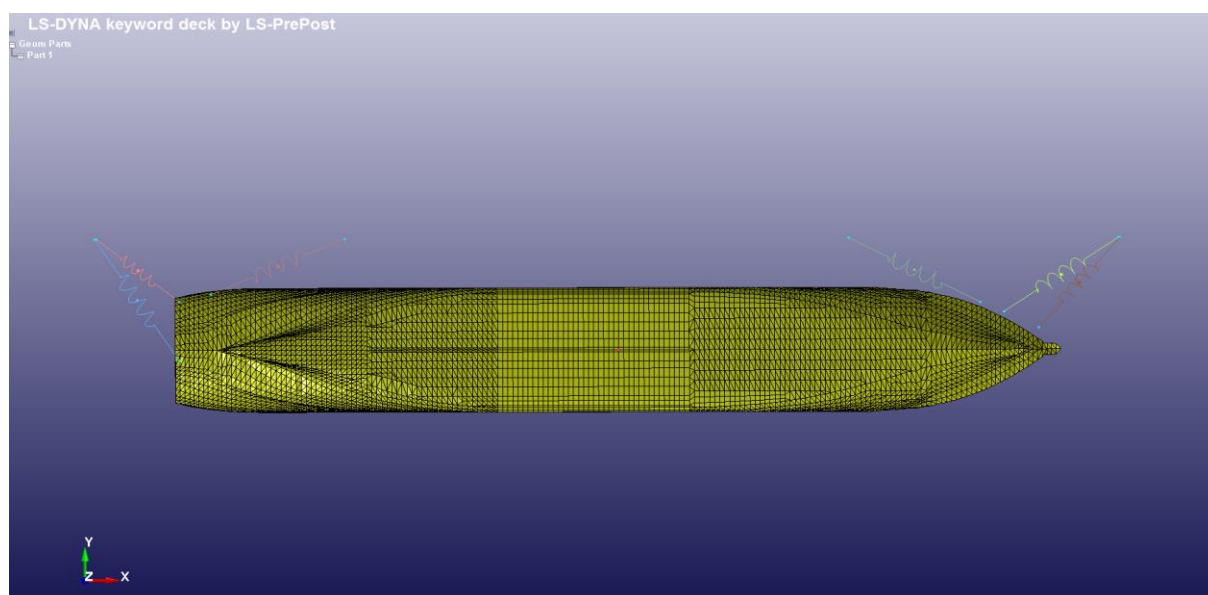
Nakon što je pozicioniran uza zid pristaništa model odbojnika je naredbom *Transform* kopiran i razmješten uzduž pristaništa u razmaku od 8 m. Ukupan broj odbojnika je 8.



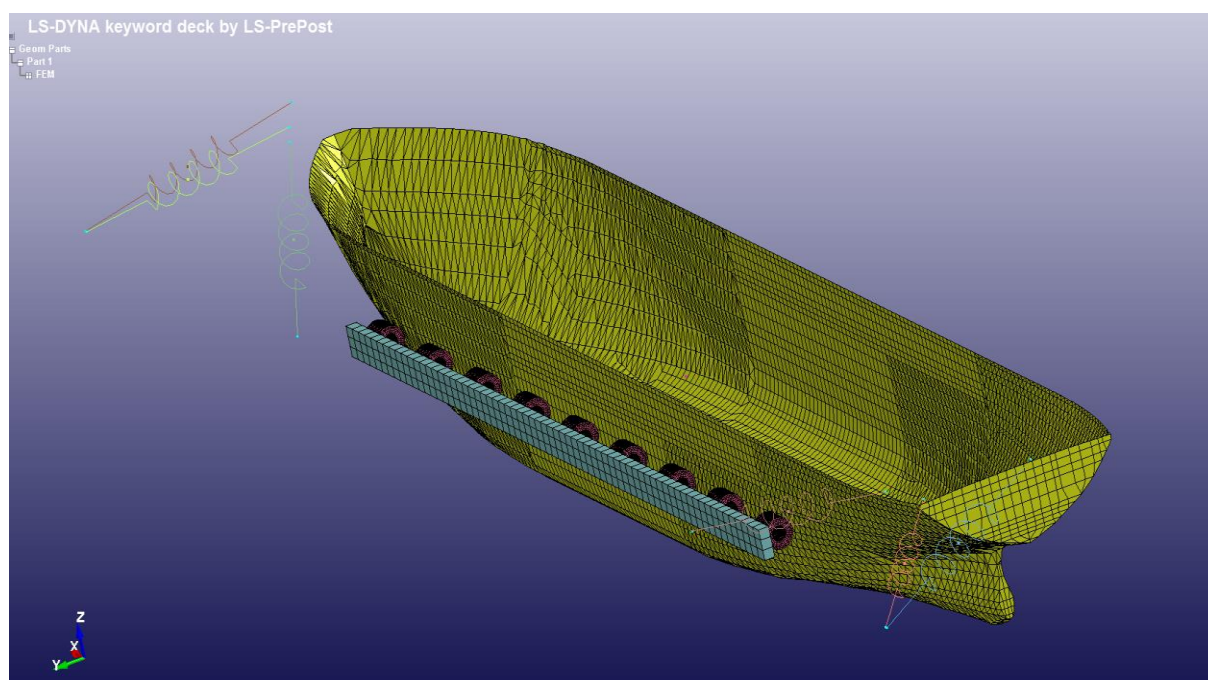
Slika 8.5. Numerički model jednog od osam odbojnika

#### 8.4. Privezne linije

Privezne linije modelirane su na sljedeći način: prema nacrtu sličnog broda iz [11] očitane su koordinate položaja pramčanih i krmenih zjevača za vez. Na položajima zjevača definirani su čvorovi koji su naredbom *\*CONSTRAINED\_EXTRA\_NODE* pridružene modelu broda. Na mogućim položajima bitvi za vez na pristaništu definirani su čvorovi. Čvorovi na pristaništu su naredbom *\*BOUNDARY\_SPC\_NODE* fiksirani. Između čvorova na brodu i onih na pristaništu definirane su opruge (*\*ELEMENT\_DISCRETE*), jednodimenzijski konačni elementi. Ukupno je definirano 6 linija, od toga po dvije bočne linije na pramcu i krmi (*eng. breast line*), te po jedan pramčani i krmeni spring odnosno pramčana i krmena linija za sprječavanje uzdužnog pomaka broda (*eng. spring line*). Jedan od mogućih rasporeda priveznih linija koji je korišten u proračunu prikazan je na Slici 8.6. Broj priveznih linija i dimenzije konopa odabrani su prema proračunu iz poglavlja 6.

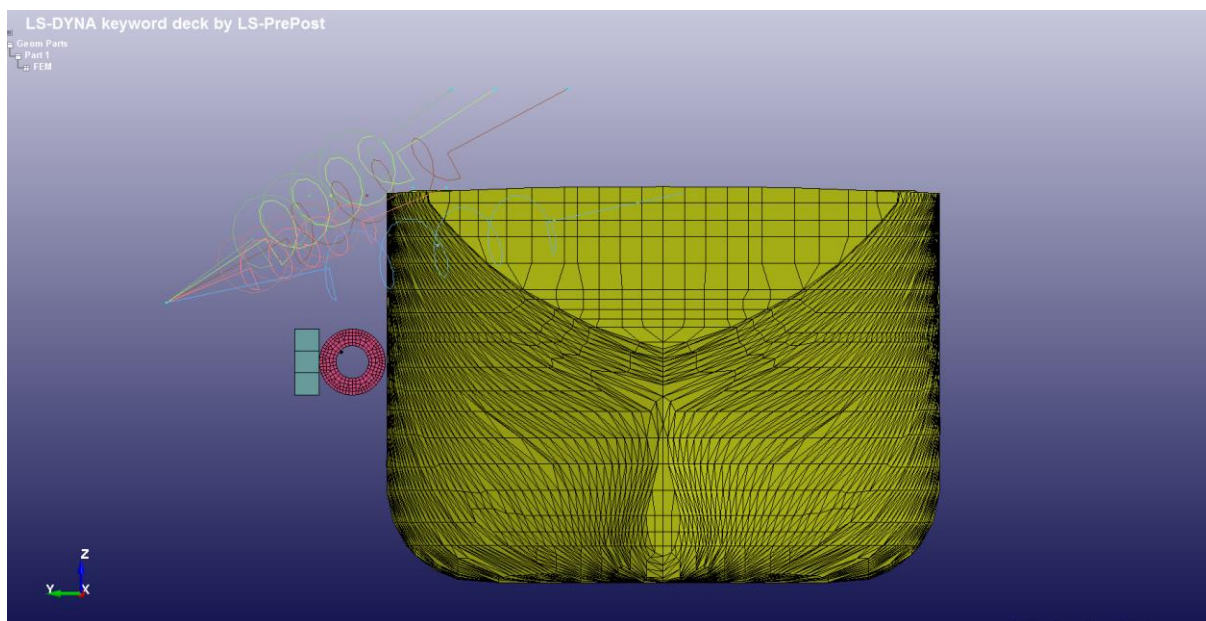


Slika 8.6. Raspored priveznih linija

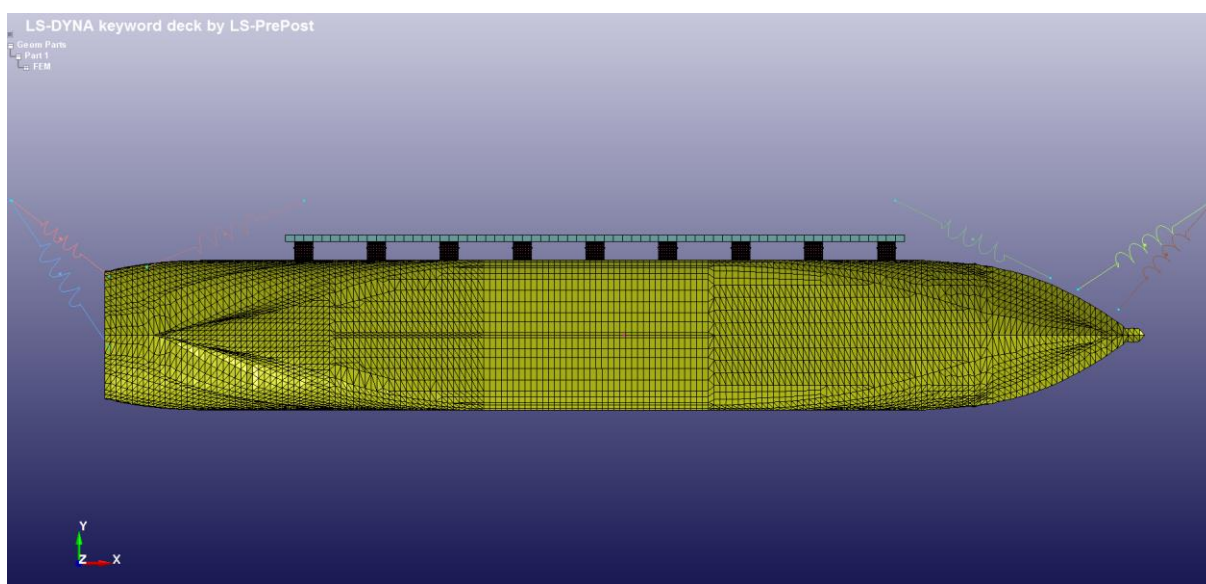


Slika 8.7. Cijeli model privezanog broda





Slika 8.8. Model privezanog broda – pogled s krme



Slika 8.9. Cijeli model privezanog broda – pogled odozgo

## 8.5. Materijali

### 8.5.1. Materijalni model krutog tijela

Materijalni model beskonačne krutosti (\*MAT\_RIGID) pridružen je modelu broda, pristaništa i šipke na kojoj su obješeni gumeni odbojnici. Ovaj materijalni model koristimo za modeliranje dijelova kod kojih nas ne zanima proračun deformacija i naprezanja. Na taj način štedimo vrijeme trajanja proračuna, dok se zadržava mogućnost analize kontakta. U kartici materijala definirana je gustoća materijala, modul elastičnosti, Poissonov koeficijent za čelik.



Keyword Input Form

MatDB Pick RefBy Add Accept Delete Default Done

☐ Use \*PARAMETER (Subsys: 1) Setting

**\*MAT\_RIGID\_(TITLE) (020) (1)**

TITLE  
Brod

1	MID	RO	E	PR	N	COUPLE	M	ALIAS
1	7850.0000	2.070e+009	0.3000000	0.0	0	0.0		

2	CMO	CON1	CON2
0.0	0	0	

3	LCO OR A1	A2	A3	V1	V2	V3
0.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

COMMENT:

Total Card: 1 Smallest ID: 1 Largest ID: 1 Total deleted card: 0

Slika 8.10. Kartica materijala \*MAT\_RIGID

### 8.5.2. Materijalni model gumenih odbojnika

Za modeliranje gumenih odbojnika korišten je materijalni model \*MAT\_MOONEY-RIVLIN\_RUBBER. U kartici materijala definirana je gustoća materijala, Poisson-ov koeficijent, i konstante A i B. Vrijednosti ovih konstanti preuzeti su iz [15].

Keyword Input Form

MatDB Pick RefBy Add Accept Delete Default Done

☐ Use \*PARAMETER (Subsys: 1) Setting

**\*MAT\_MOONEY-RIVLIN\_RUBBER\_(TITLE) ((null)) (1)**

TITLE  
BokobranMat027

1	MID	RO	PR	A	B	REF
5	2716.0000	0.4996700	2.930e+005	1.770e+005	0.0	

2	SGL	SW	ST	LCID
0.0	0.0	0.0	0	

COMMENT:

Total Card: 1 Smallest ID: 5 Largest ID: 5 Total deleted card: 0

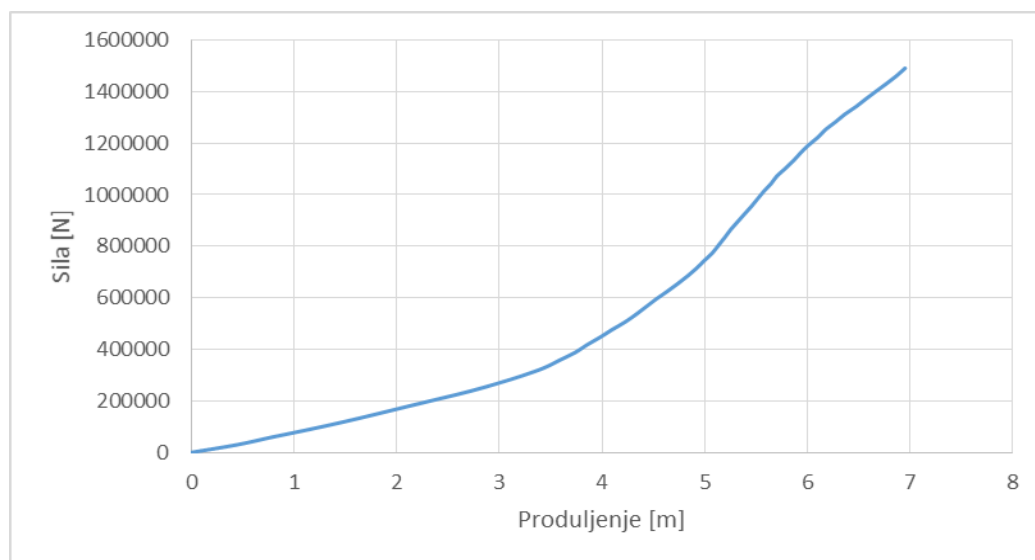
Slika 8.11. Kartica materijala \*MAT\_MOONEY-RIVLIN\_RUBBER

### 8.5.3. Materijalni model priveznih linija

Za modeliranje priveznih linija korišten je materijalni model

\*MAT\_NONLINEAR\_ELASTIC. Model predviđa nelinearnu ovisnost sile o produljenju.

Krivulja ovisnosti sile o produljenju je zbog različite duljine pojedinih konopa definirana za svaki konop posebno. Za materijal konopa odabran je sintetički materijal najlon. Svojstva najlonskog konopa preuzeta su iz [12]. Na slici 8.12. prikazana je krivulja ovisnosti sile o produljenju za novi pleteni najlonski konop promjera 80 mm, minimalne prekidne čvrstoće od 152 tone, duljine 20 m. Duljina konopa određuje vrijednost ukupnog produljenja.



Slika 8.12. Ovisnost sile o produljenju najlonskog konopa

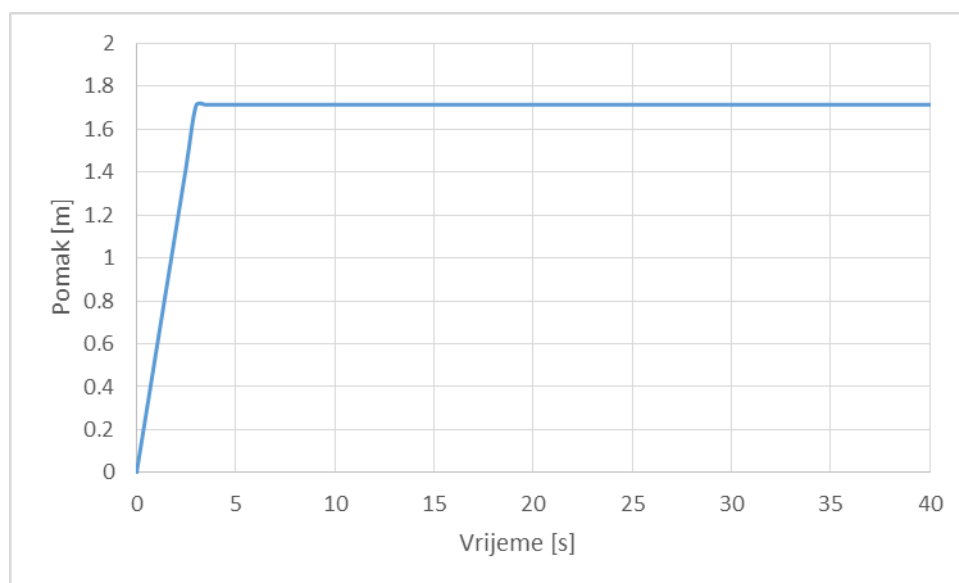
## 8.6. Rubni uvjeti

Pristanište, kao i čelične šipke na kojoj vise odbojnici fiksirani su. Fiksiranje položaja pristaništa i čelične šipke izvedeno je naredbom \*BOUNDARY\_SPC\_SET kojom su spriječeni pomaci i rotacije čvorova modela pristaništa i čelične šipke. Naredbom \*SET\_NODE\_LIST su odabrani čvorovi na koje će biti primijenjen ovaj rubni uvjet.

### 8.6.1. Pritezanje priveznih linija

Kako sila u priveznim linijama tijekom analize ne bi postala negativna, odnosno da se izbjegne labavost konopa potrebno je priveznim linijama narinuti početnu silu pritezanja. Zamišljeno je da se sila pritezanja postigne pomakom jednog čvora opruge, onog na pristaništu. Pomak čvora je postignut pomoću naredbe \*BOUNDARY\_PRESCRIBED\_MOTION\_SET. Pomak čvora je u smjeru opruge. Smjer pomaka je definiran vektorom, naredbom \*DEFINE\_VECTOR. Položaj repa vektora definiran je u čvoru opruge na brodu, dok je položaj glave definiran u čvoru na pristaništu. Vektori su definirani za svaku liniju. Pomak je definiran krivuljom pomaka čvora u odnosu na vrijeme. Krivulja je definirana za iznos produljenja konopa pri vrijednosti sile od 8 % minimalne prekidne sile, na način da se vrijednost pomaka postupno povećava tijekom vremena. Maksimalna vrijednost pomaka dostiže se za 3.5 sekundi i ostaje konstantna. S obzirom da iznos produljenja ovisi i o duljini konopa, krivulja se definira posebno za svaku liniju. Slika 8.13. prikazuje pomak čvora u

vremenu za jedan konop, duljine 20 m na pramčanoj priveznoj liniji. Krivulja je definirana naredbom \*DEFINE\_CURVE.



Slika 8.13. Pomak čvora opruge

#### 8.6.2. Definiranje kontakta

Kontakt se pojavljuje kada površina jednog dijela modela prodire u površinu drugog dijela modela. Kontakt je definiran naredbom \*CONTACT\_SURFACE\_TO\_SURFACE. Površine koje sudjeluju u kontaktu definirane su unošenjem naziva dijelova modela čije površine sudjeluju u kontaktu (*Part ID*). Ukupno su definirana tri kontakta: kontakt između broda i gumenih odbojnika, kontakt između gumenih odbojnika i čelične šipke i kontakt između gumenih odbojnika i zida pristaništa. Potrebno je još definirati statički i dinamički koeficijent trenja. Vrijednost statičkog koeficijenta trenja iznosi 0.4, a dinamičkog 0.39 i preuzeti su iz [15].

#### 8.6.2. Pozivanje programa MCOL

Program MCOL se poziva naredbom \*BOUNDARY\_MCOL. Potrebno je definirati broj brodova, vremenski korak tijekom MCOL proračuna, vremenski korak ispisa MCOL rezultata. MCOL datoteka je pozvana unošenjem njenog naziva i definiranjem za koje kruto tijelo odnosno brod se odnosi MCOL datoteka.

MCOL datoteka izrađuje se prema uputama MCOL – Users Manual, datoteka sadrži matricu masa broda, matricu krutosti povratnih sila, matricu dodane mase, matricu hidrodinamičkog prigušenja. Ove matrice određene su pomoću programa HydroSTAR. Broj matrica hidrodinamičkog prigušenja moguće je definirati za maksimalno 60 frekvencija. Izgled MCOL datoteke prikazan je na slici 8.14.

```

002$rigid body mass matrix (Mrb)
0.5755E+07 0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00
0.0000E+00 0.5755E+07 0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00
0.0000E+00 0.0000E+00 0.5755E+07 0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00
0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00 0.5495E+08 0.0000E+00 0.0000E+00
0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00 0.2115E+10 0.0000E+00
0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00 0.2106E+10
003$hydrostatic restoring matrix (K)
0.1395E+05 0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00
0.0000E+00 0.1395E+05 0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00
0.0000E+00 0.0000E+00 0.1395E+08 0.0000E+00 -0.1004E+07 0.0000E+00
0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00 0.3541E+08 0.0000E+00 0.0000E+00
0.0000E+00 0.0000E+00 -0.1003E+07 0.0000E+00 0.8515E+10 0.0000E+00
0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00 0.8515E+10
004$buoyancy parameters (xb,yb,zb,W,B,ZoGref,PHIref,TETArefer)
0.00000000 0.00000000 -2.17600000 5.6456E+08 5.6456E+08 0.00000000 0.00000000 0.00000000
005$added mass matrix (Ma)
7.9100E+00 0.0000E+00 -6.3100E+03 0.0000E+00 -1.1500E+07 0.0000E+00
0.0000E+00 1.6700E+06 0.0000E+00 -5.4200E+05 0.0000E+00 5.3600E+05
-5.7300E+03 0.0000E+00 8.6800E+06 0.0000E+00 3.7800E+06 0.0000E+00
0.0000E+00 -5.2200E+05 0.0000E+00 3.1300E+07 0.0000E+00 -6.0500E+06
-1.1500E+07 0.0000E+00 3.7800E+06 0.0000E+00 3.3600E+09 0.0000E+00
0.0000E+00 5.3700E+05 0.0000E+00 -5.9300E+06 0.0000E+00 1.3700E+09
006$nsurf and viscous damping surfaces (rho,dCl/dalpa,Cd,A,nx,ny,nz,xc,yc,zc)
000
007$parameter for checking convergence (epsilon, c7)
0.1000E-03 0.1000E+01
008$nbomega, omega and wave damping matrixes [C(w)]
001
1.5000E+00
1.3515E+05 -1.2164E+05 2.0516E+05 4.2132E+06 1.3130E+07 -1.5506E+07
-1.1919E+05 4.3778E+06 -4.9292E+05 -1.0677E+07 -1.6646E+07 4.0459E+05
2.0230E+05 -5.5946E+05 5.8844E+06 1.2730E+08 2.9745E+07 4.5233E+06
4.1559E+06 -1.2090E+07 1.2749E+08 2.7629E+09 6.2261E+08 1.2898E+08
1.3081E+07 -1.7019E+07 2.9885E+07 6.2477E+08 1.3874E+09 -1.6470E+09
-1.5615E+07 5.5079E+05 4.0346E+06 1.1862E+08 -1.6665E+09 2.9512E+09

```

Slika 8.14. MCOL datoteka

## 8.7. Definiranje opterećenja

Opterećenje je definirano na temelju rezultata uzbudnih sila i momenata određenih u programu HydroSTAR. Uzbudne sile i momenti određeni su za pet smjerova nailaznih valova i to:  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $135^\circ$  i  $180^\circ$  (slika 5.1). Nailazni valovi su jedinične amplitude što odgovara visini val od 2 m. Rezultati uzbudnih sila i momenata su uzeti za frekvenciju vala od 1.5 rad/s što odgovara periodu od 4.2 sekunde. Opterećenja su definirana u težištu broda naredbom \*LOAD\_NODE\_POINT. Uzbudne sile i momente koji su dani u frekvencijskoj domeni trebalo je prebaciti u vremensku domenu pomoću izraza:

$$F_i(t) = F_i \cos(\omega_e t + \varepsilon_{wi}) \quad (49)$$

gdje je:

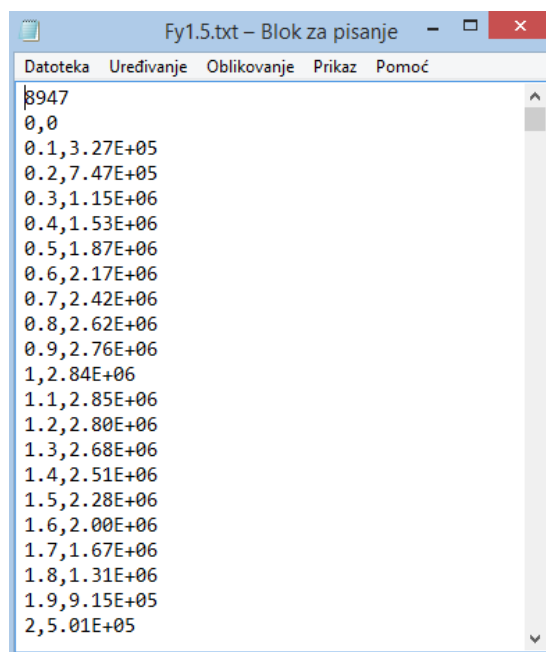
$F_i$  – amplituda uzbudne sile ili momenta,

$t$  – vremenski korak,

$\varepsilon_{wi}$  – fazni pomaci uzbude u odnosu na val,

$\omega_e$  – susretna frekvencija.

Krivulje su u Excelu prebačene u vremensku domenu, vremenski korak je 0.1 s. Krivulja je definirana za određeno vrijeme trajanja, zatim su podaci prebačeni u .txt datoteku u kojoj se na početku definira broj točaka (slika 8.16.) To je urađeno za svih 6 komponenti opterećenja. Krivulje opterećenja definirane su naredbom \*DEFINE\_CURVE, unošenjem .txt datoteke.



Slika 8.16. Točke krivulje opterećenja

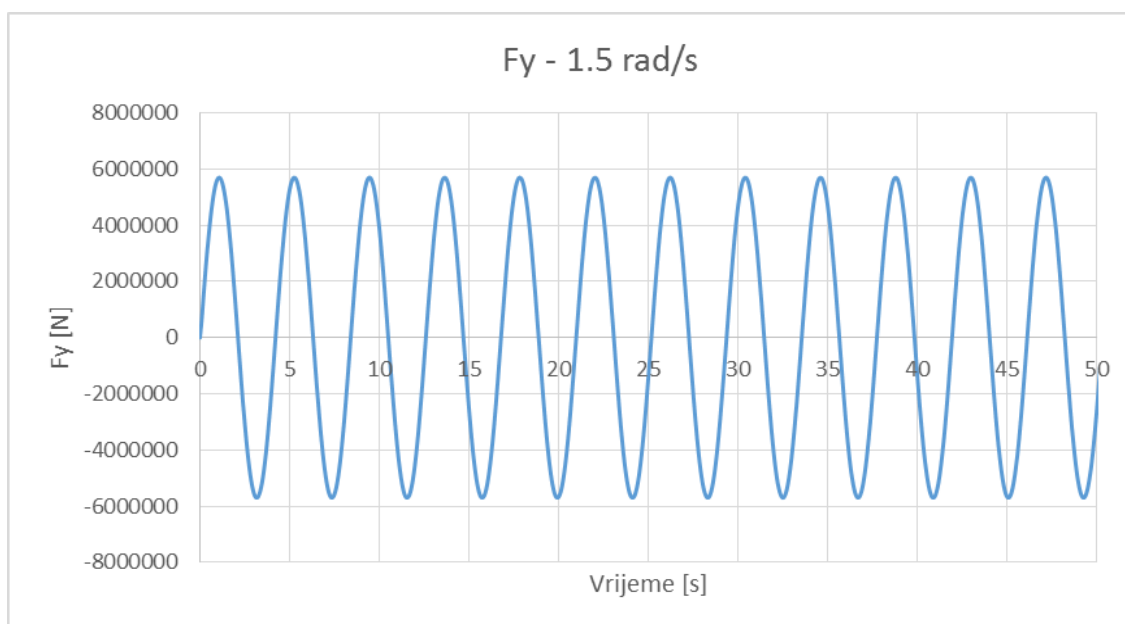
#### 8.7.1. Zadavanje gravitacije

Na gumene odbojnice zadano je djelovanje gravitacije. Gravitacija se zadaje naredbom \*LOAD\_BODY\_Z, u kojoj treba definirati varijablu SF (*Scale Factor*) koja iznosi  $9.81 \text{ m/s}^2$ . Uz to potrebno je još definirati varijablu LCID koja se odnosi na naredbu \*DEFINE\_CURVE gdje je definirana krivulja ovisnosti gravitacije o vremenu. Krivulja se definira tako da je vrijednost ordinate 1.

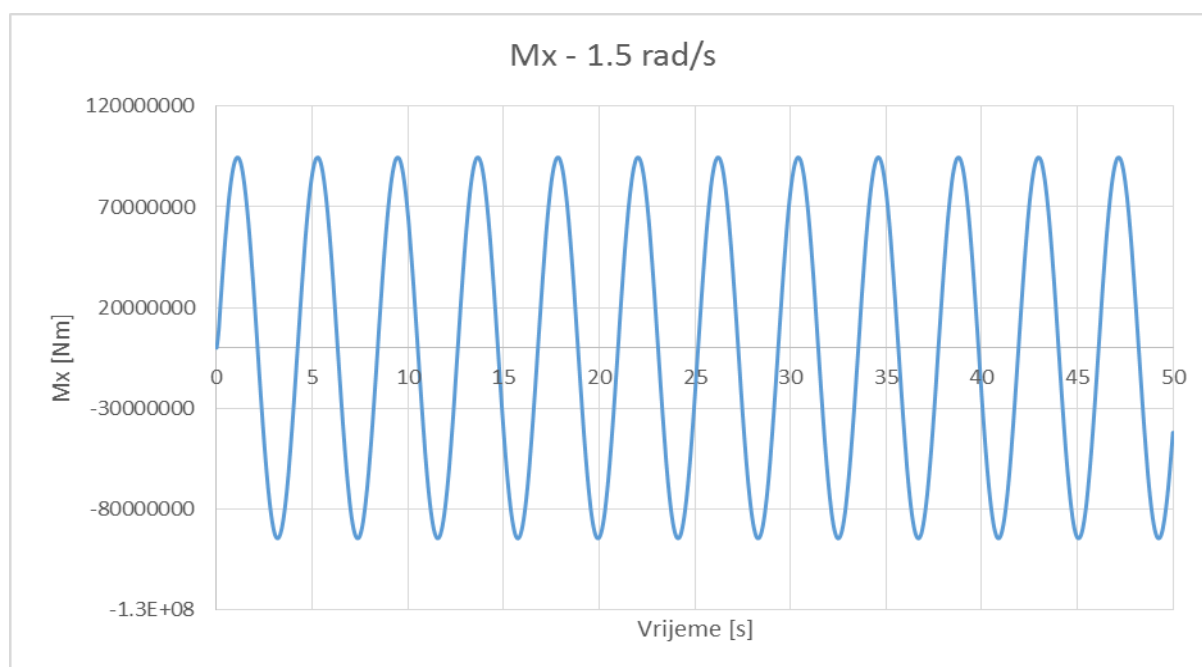
## 9. Provedba proračuna i analiza rezultata

### 9.1. Prvi slučaj – valovi u bok broda

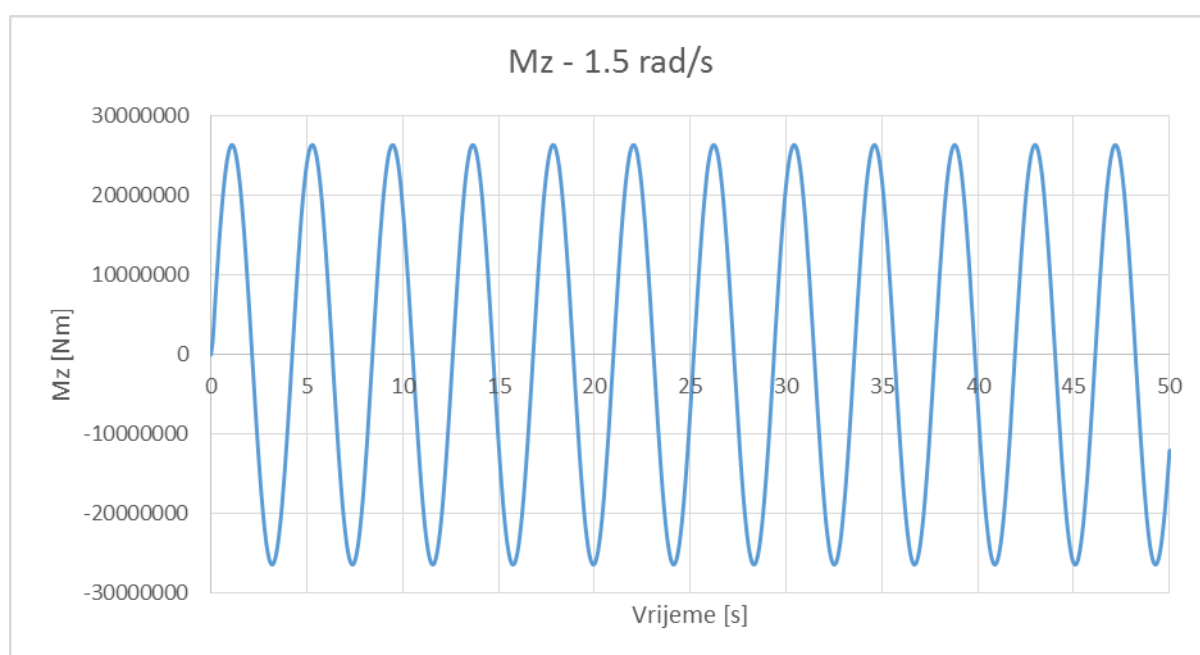
Numerički model prikazan je na slici 9.4. Broj i dimenzije priveznih linija odabrane su na temelju proračuna koeficijenta sigurnosti iz poglavlja 6. Dimenzije gumenih cilindričnih odbojnika odabrane su prema proračunu iz poglavlja 7. Dimenzije iznose  $\varnothing D \times \varnothing d = 1600 \times 800$  mm, gdje su  $\varnothing D$  i  $\varnothing d$  vanjski i unutarnji promjer prema slici 8.4. Energija apsorpcije ovog odbojnika je 288 kNm. Odabrana duljina odbojnika je 1500 mm, dok je razmak između odbojnika 8 m. Opterećenja broda čine uzbudne sile i momenti nailaznih valova dobivene pomoću programa HydroSTAR. Susretni kut je  $90^\circ$ , odnosno valovi dolaze s boka broda. Odabrana frekvencija vala je 1.5 rad/s. Obilježja vjetrovnih valova preuzeti su iz [3] za 100 godišnji povratni period. Slijedeće slike prikazuju značajnije uzbudne sile i momente u vremenskoj domeni, dobivene u programu HydroSTAR.



Slika 9.1. Komponenta uzbudne sile u poprečnom smjeru

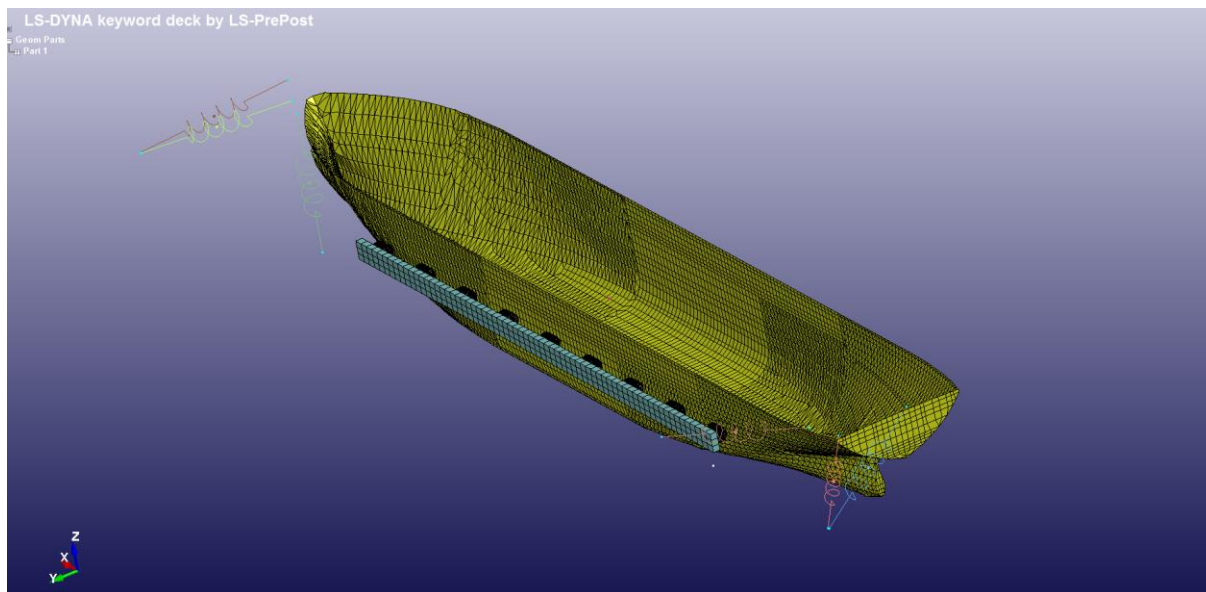


Slika 9.2. Uzbudni moment ljuľjanja



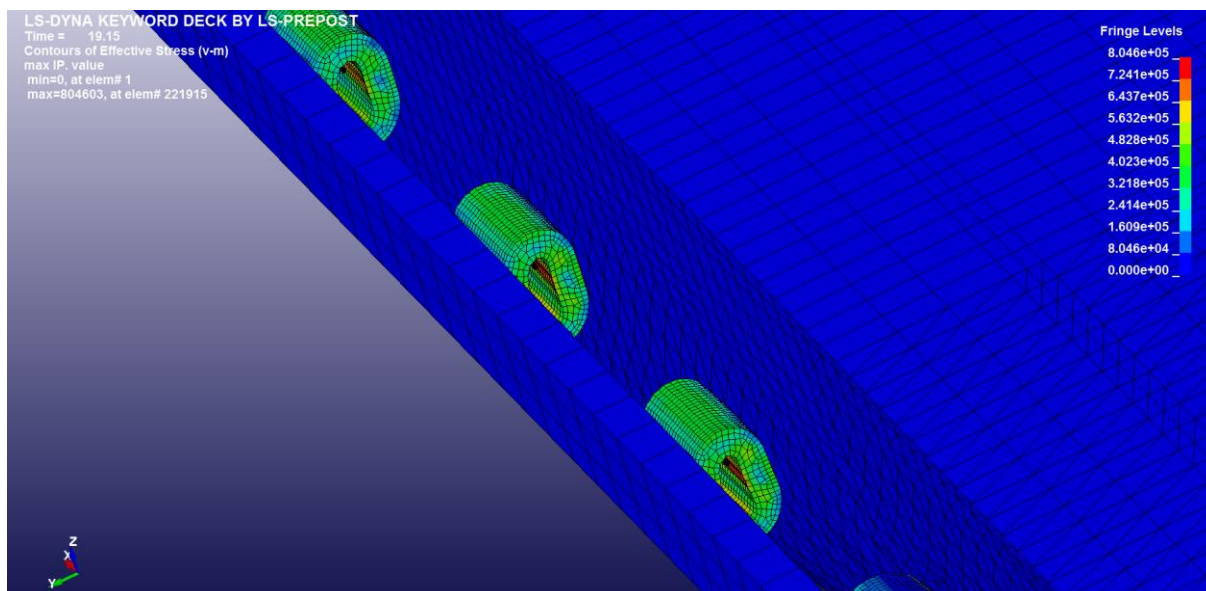
Slika 9.3. Uzbudni moment zaošijanja





Slika 9.4. Numerički model za prvi slučaj

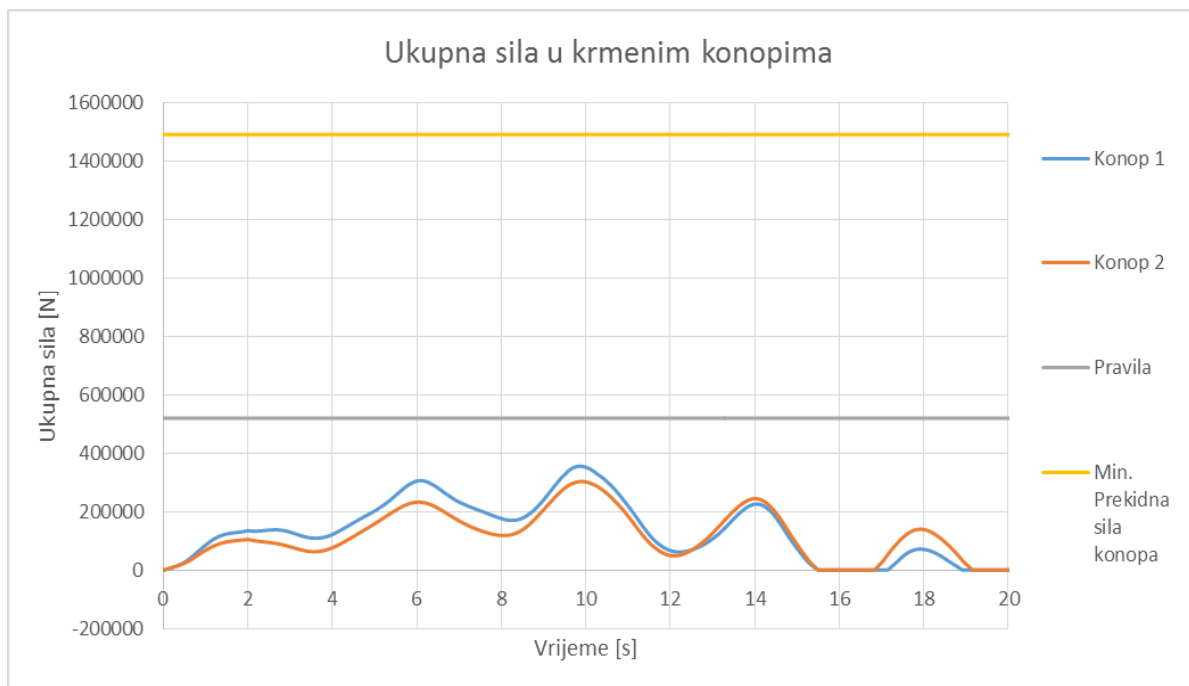
Analiza prvog slučaja je se zaustavila nakon 15 sekundi zbog prevelike deformacije jednog odbojnika. Nakon toga dimenzije odbojnika su povećane na  $2000 \times 1000$  mm, i duljina odbojnika je povećana na 2000 mm. Ukupna energija apsorpcije jednog odbojnika s ovim dimenzijama je 900 kNm. Nakon provedene analize uočena je velika deformacija jednog odbojnika na krmi. Uzrok ovolike deformacije je velika kinetička energija broda uslijed momenta zaošijanja. Velik moment zaošijanja se pojavljuje zbog položaja težišta u uzdužnom smjeru koji se za balastno stanje krcanja nalazi na 63.74 m.



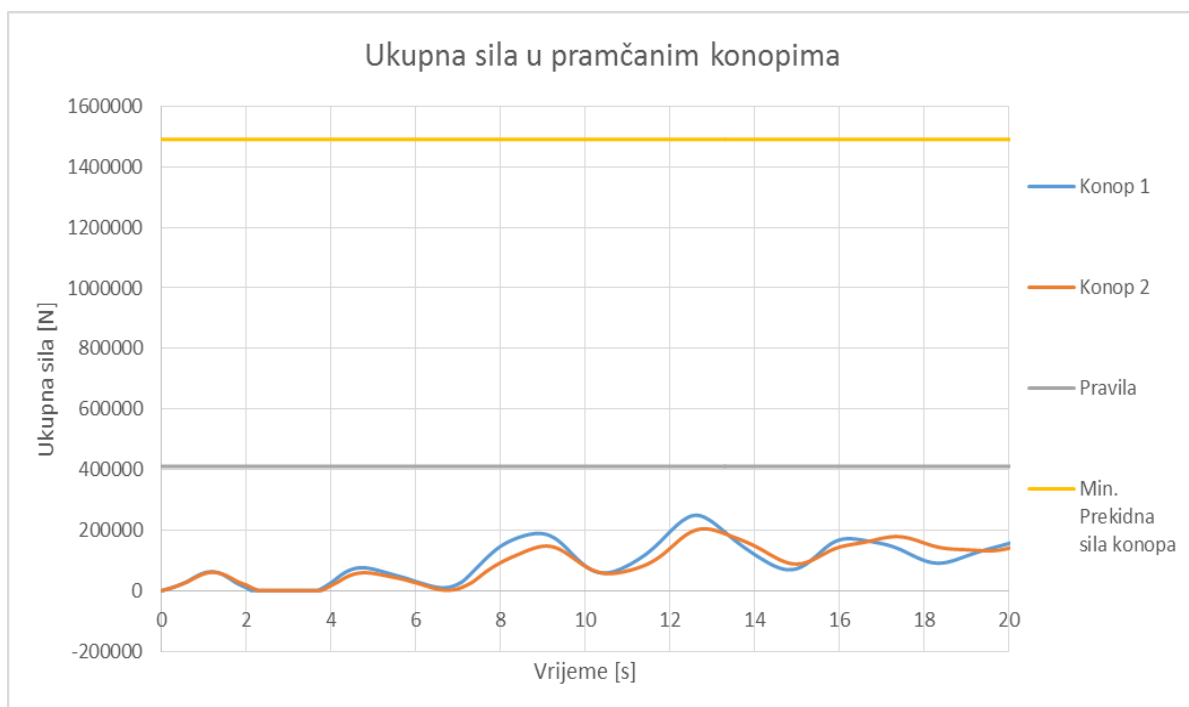
Slika 9.2. Von Mises naprezanja krmernih odbojnika



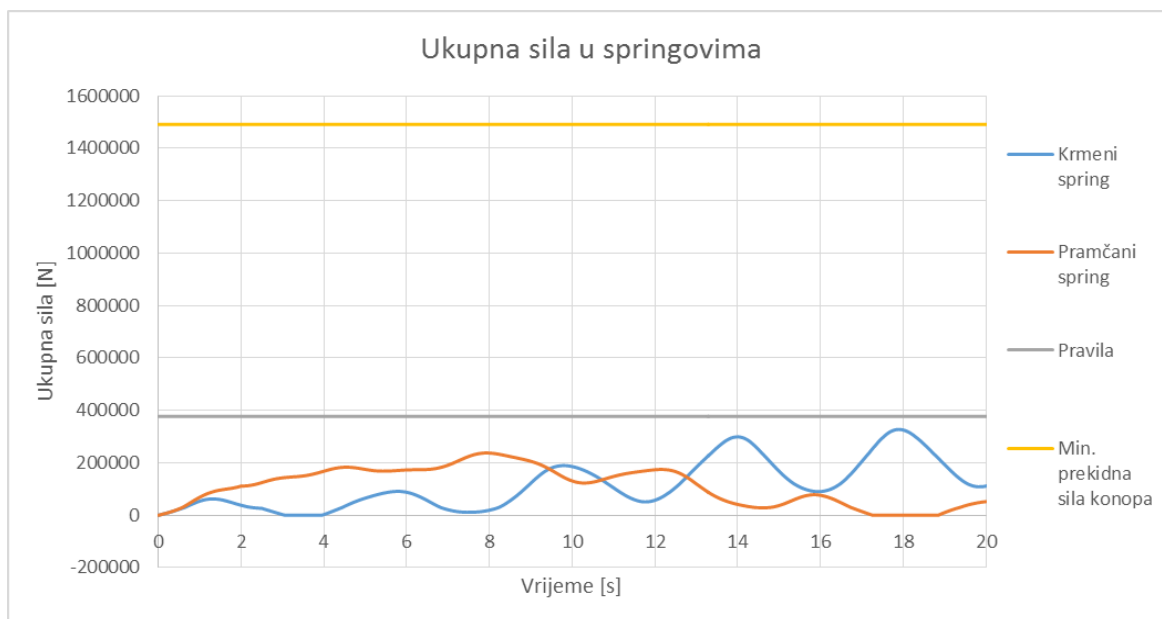
Na slijedećim dijagramima prikazane su sile u konopima svih priveznih linija, uključujući i sile dobivene prema pravilima iz poglavlja 6 (Tablica 6.9.) za jedan konop privezne linije. Dijagrami prikazuju i vrijednost minimalne prekidne sile konopa.



Slika 9.3. Ukupna sila u krmenim konopima



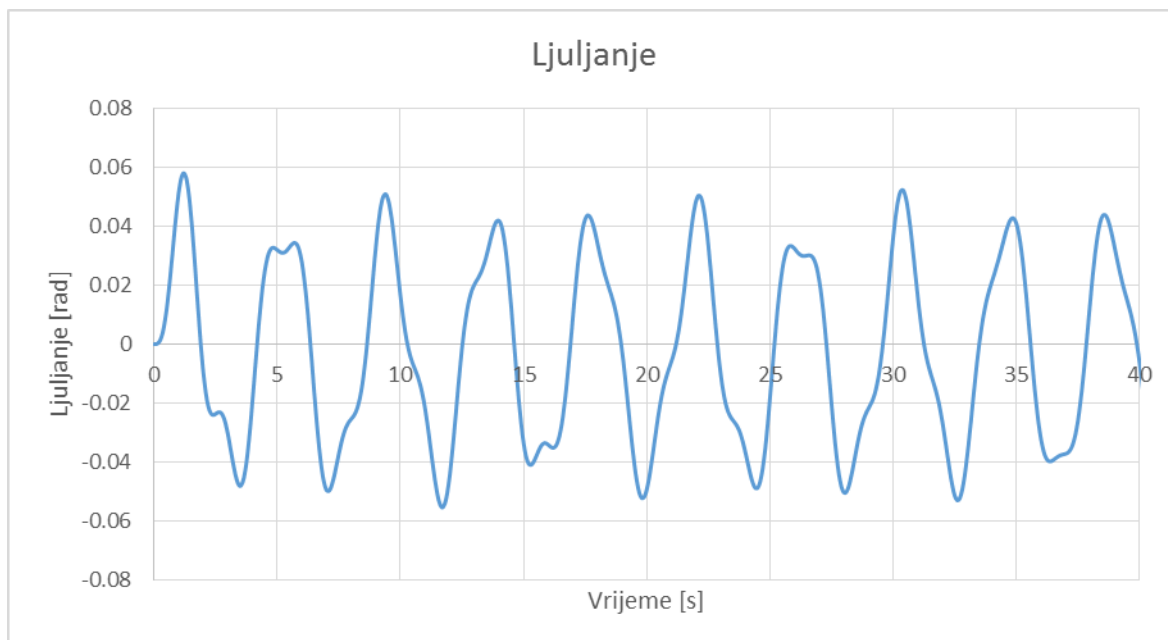
Slika 9.4. Ukupna sila u pramčanim konopima



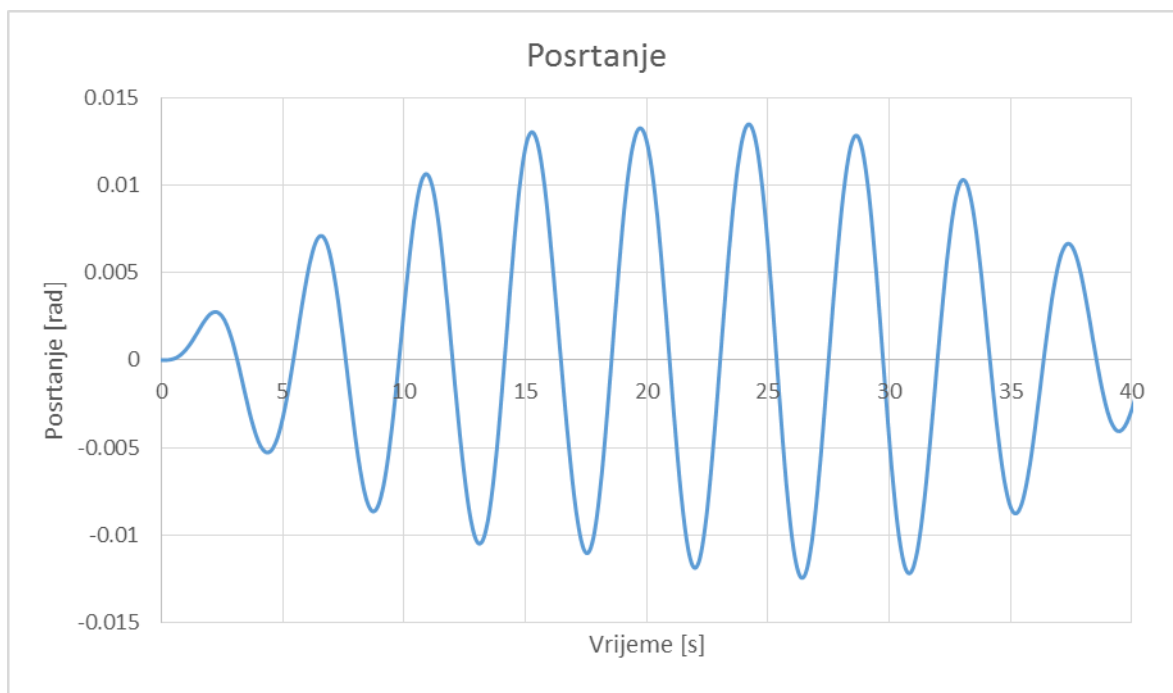
Slika 9.5. Ukupna sila u springovima

Maksimalno opterećenje pojavljuje se u krmenim konopima, a opet je uzrok velik moment zaošijanja zbog uzdužnog položaja težišta. Vrijednost ukupne sile razvlačenja u krmenim konopima iznosi maksimalno 353 kN, što je oko 36 tona, dok minimalna prekidna čvrstoća konopa iznosi 152 tona. Koeficijent sigurnosti iznosi 4.2 što zadovoljava pravila.

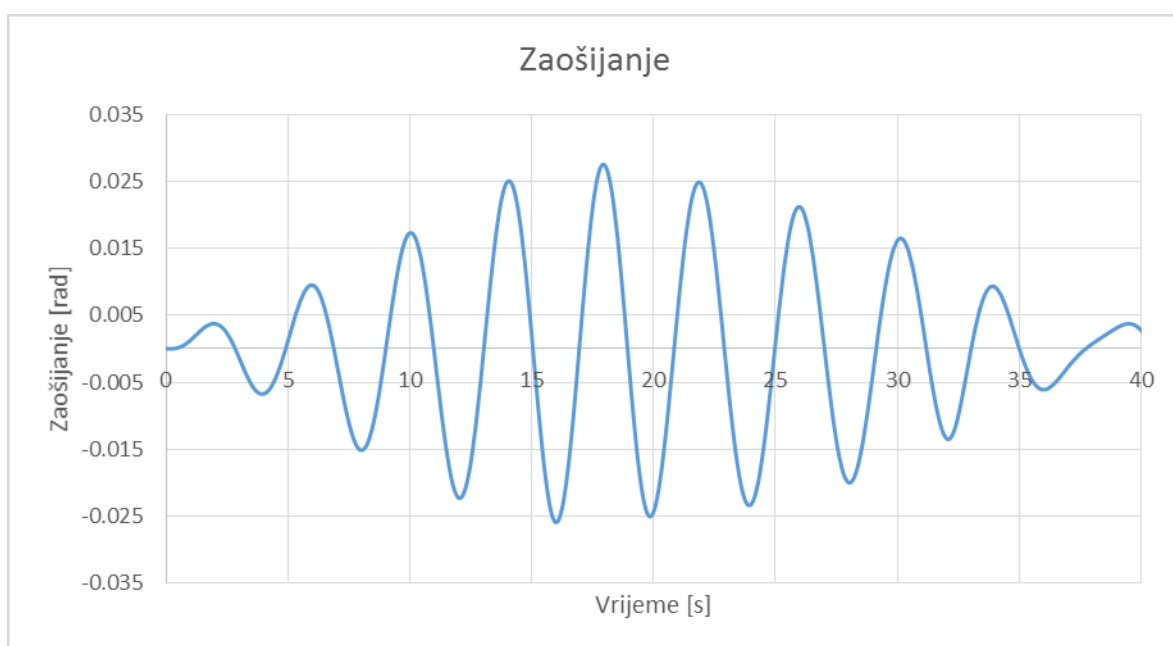
Na slijedećim dijagramima prikazani su rezultati pomaka broda za sva tri rotacijska stupnja slobode.



Slika 9.10. Pomak broda oko osi x u vremenu

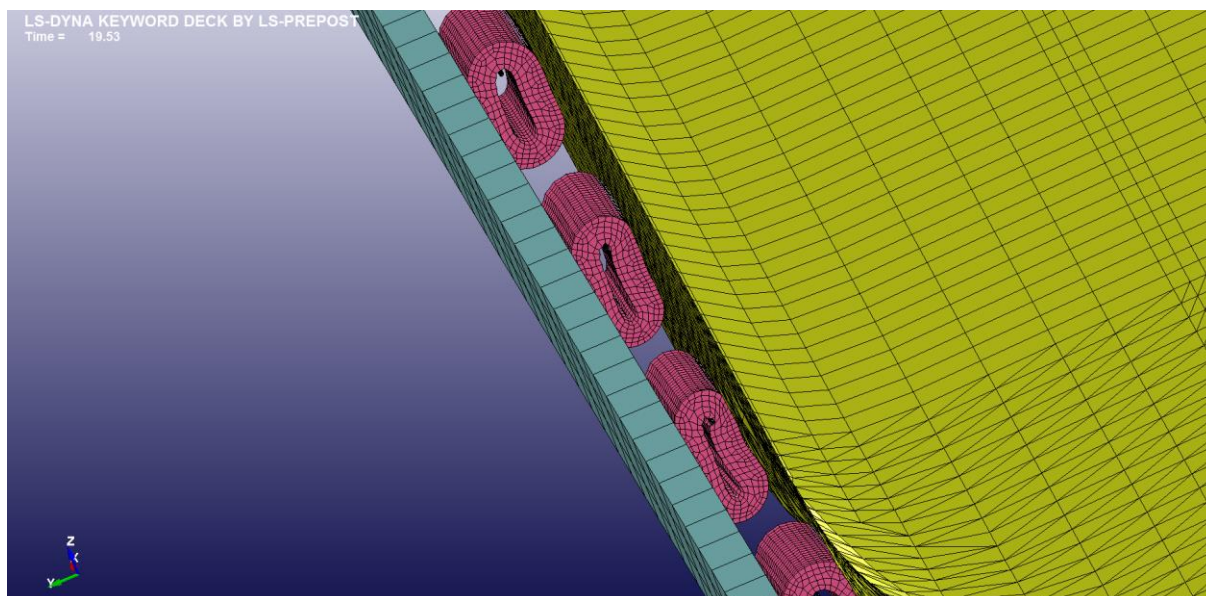


Slika 9.11. Pomak broda oko osi y u vremenu



Slika 9.12. Pomak broda oko osi z u vremenu

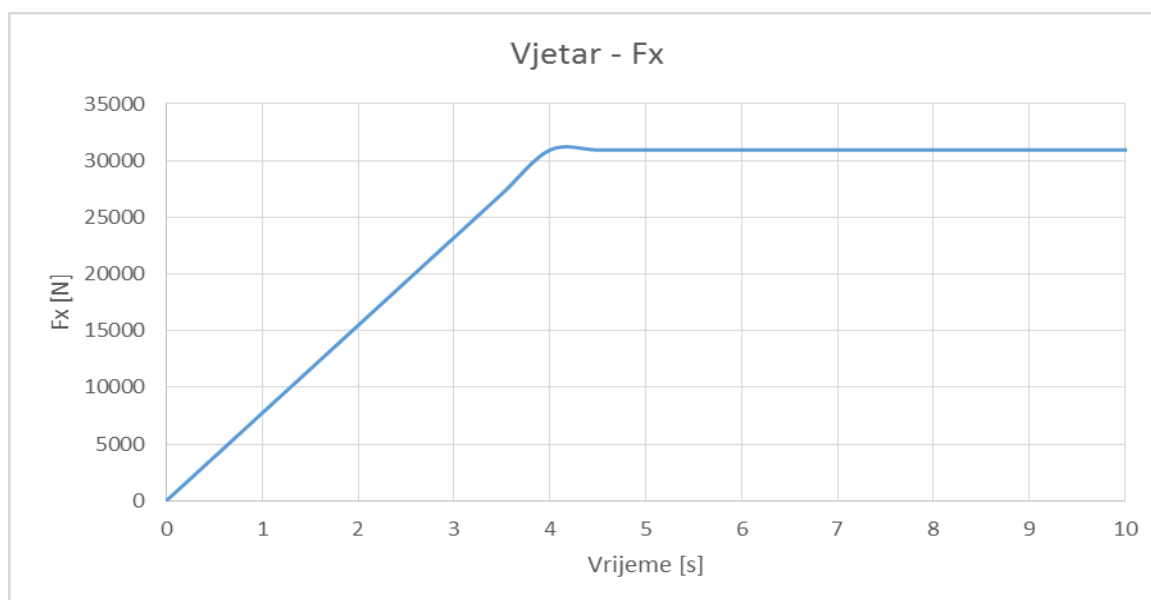
Na slici 9.13. prikazane su deformacije odbojnika u području krme. Vidljivo je da jedan od odbojnika ima veliku deformaciju.



Slika 9.13. Deformacija odbojnika u području krme

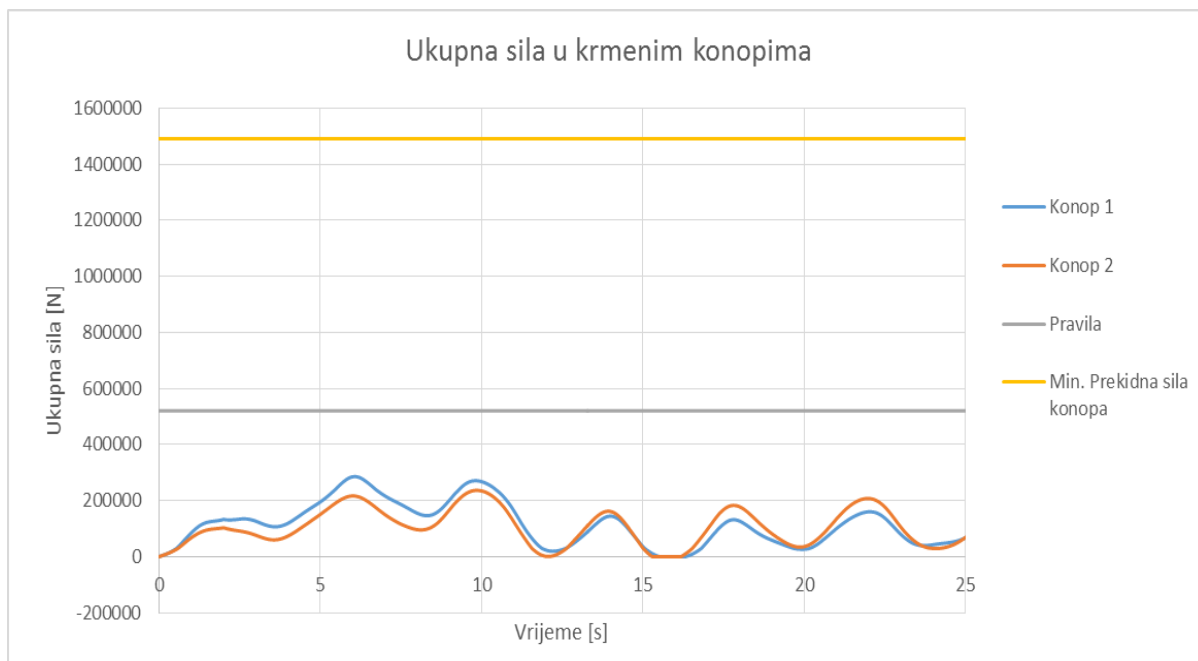
## 9.2. Drugi slučaj – sjeverni vjetar i valovi u bok broda

Drugi slučaj uključuje još i utjecaj sjevernog vjetra koji izaziva razmatrane valove u prvom slučaju. Komponente sile i moment zaošijanja određeni su prema pravilima iz poglavlja 6 za satnu brzinu vjetra u iznosu od 24.2 m/s. Veličine komponenti sile i momenta zaošijanja iznose:  $F_x = 30940$  N,  $F_y = 306302$  N,  $M_z = -7631469$  Nm. Komponente sile i moment zaošijanja od vjetra su definirani u težištu broda naredbom \*LOAD\_NODE\_POINT. Krivulja sile i momenta u vremenu definirane su tako da se opterećenje u početku postupno povećava do svoje konstantne vrijednosti.

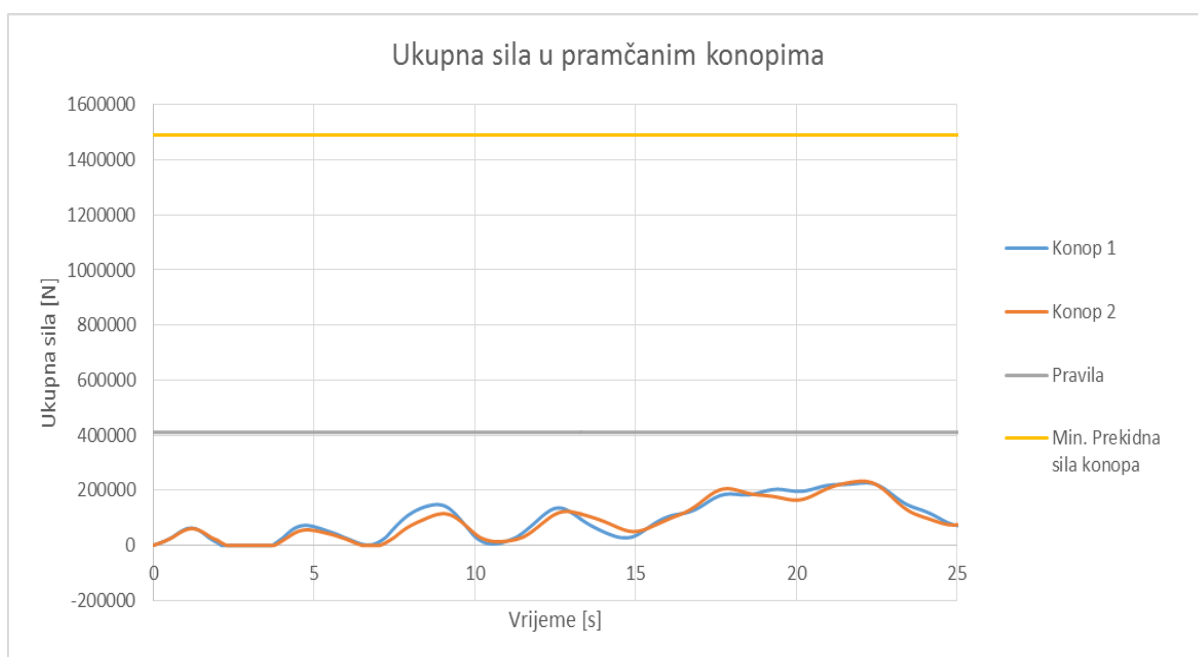


Slika 9.14. Komponenta sile vjetra u uzdužnom smjeru

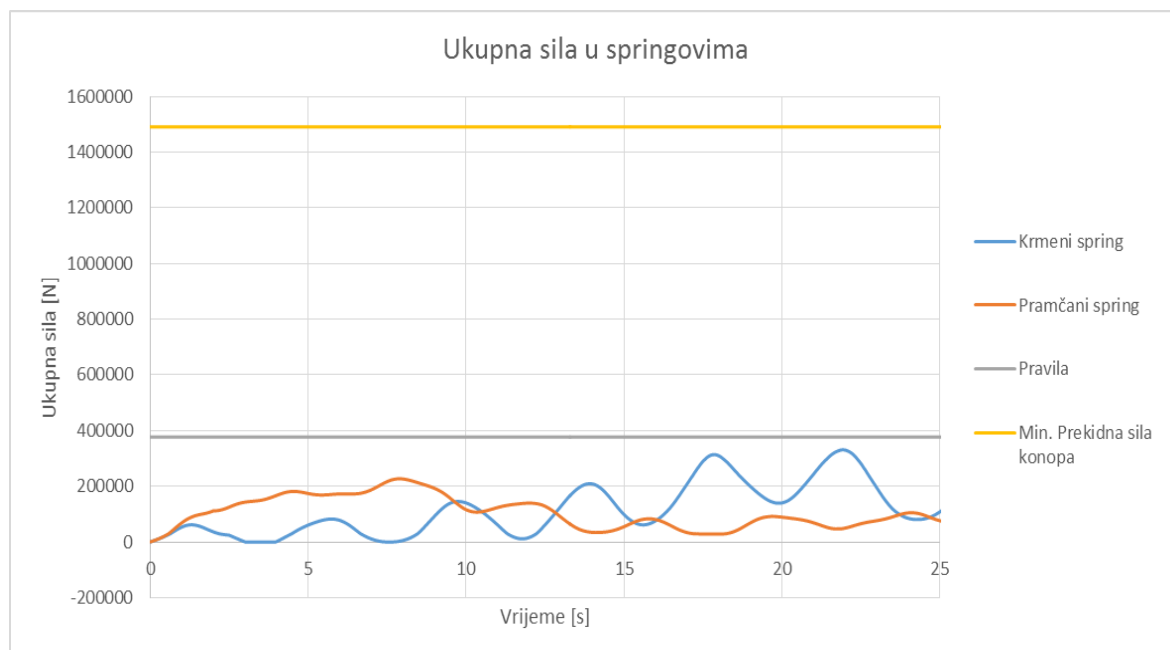
Slijedeći dijagrami prikazuju ukupne sile u konopima priveznih linija, uključujući i sile dobivene prema pravilima iz poglavlja 6 za jedan od konopa privezne linije. Dijagrami prikazuju i vrijednost minimalne prekidne sile konopa.



Slika 9.15. Ukupna sila u krmenim konopima



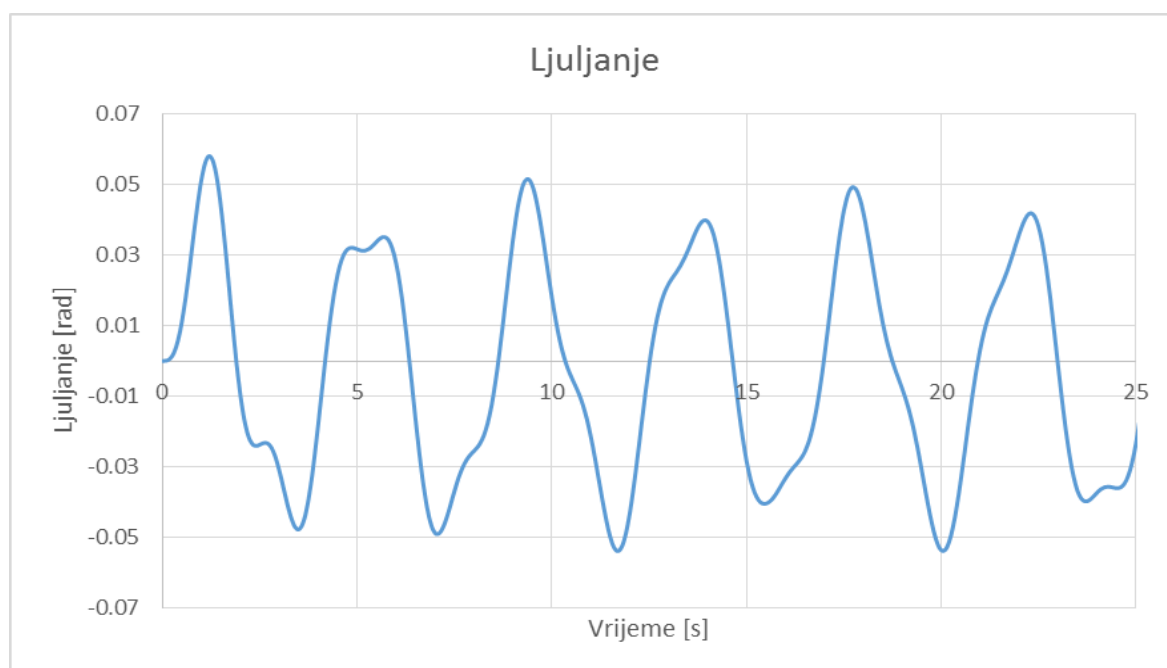
Slika 9.16. Ukupna sila u pramčanim konopima



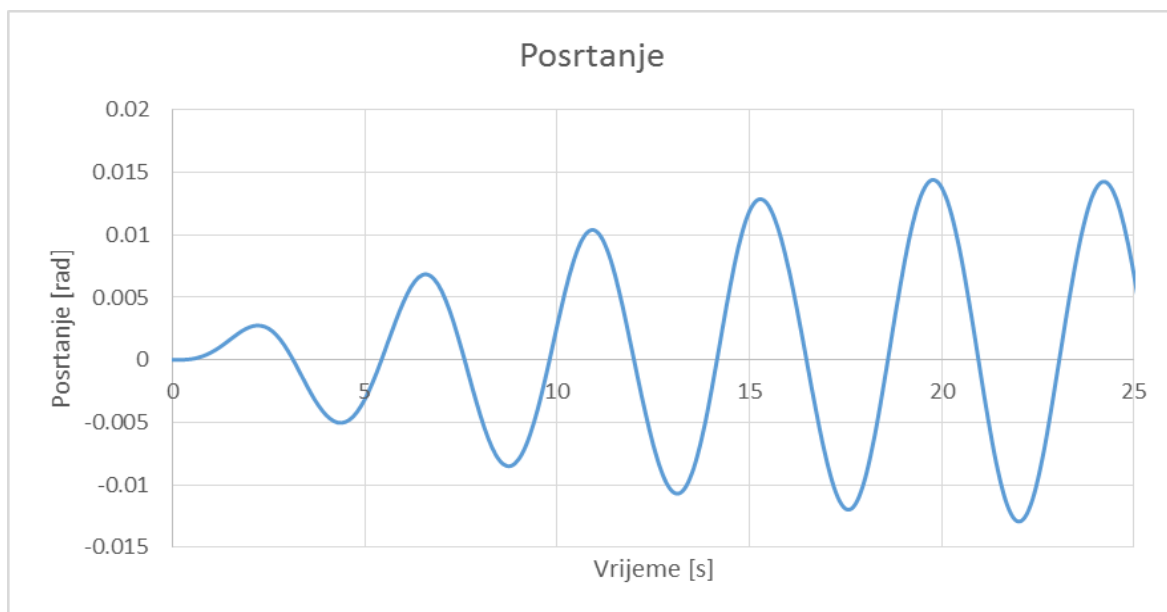
Slika 9.17. Ukupna sila u springovima

Na dijagramu sila u krmnim konopima se vidi da je ukupna sila razvlačenja konopa manja u odnosu na prvi slučaj. Maksimalna sila iznosi oko 290 kN, odnosno oko 29.5 tona što je za 7 tona manje u odnosu na prvi slučaj. Na dijagramu sila u pramčanim konopima se vidi da je u jednom konopu došlo do povećanja opterećenja za oko 4 tone, dok je u drugom došlo do smanjivanja opterećenja za oko 2 tone.

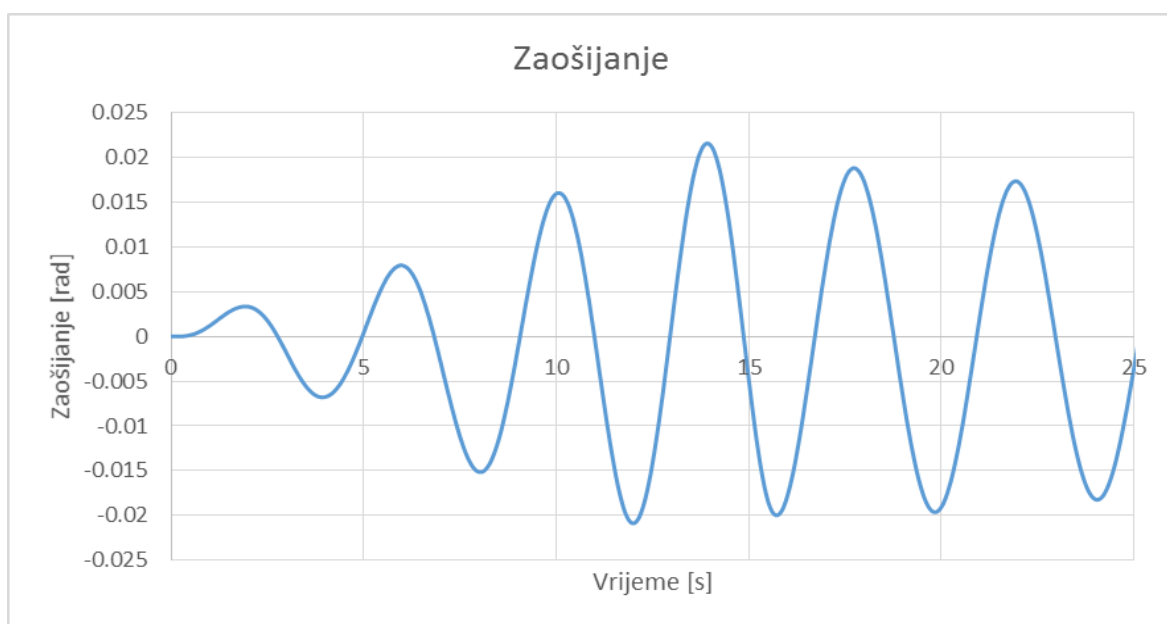
Na slijedećim dijagramima prikazani su rezultati pomaka broda za sva tri rotacijska stupnja slobode.



Slika 9.18. Pomak broda oko osi x



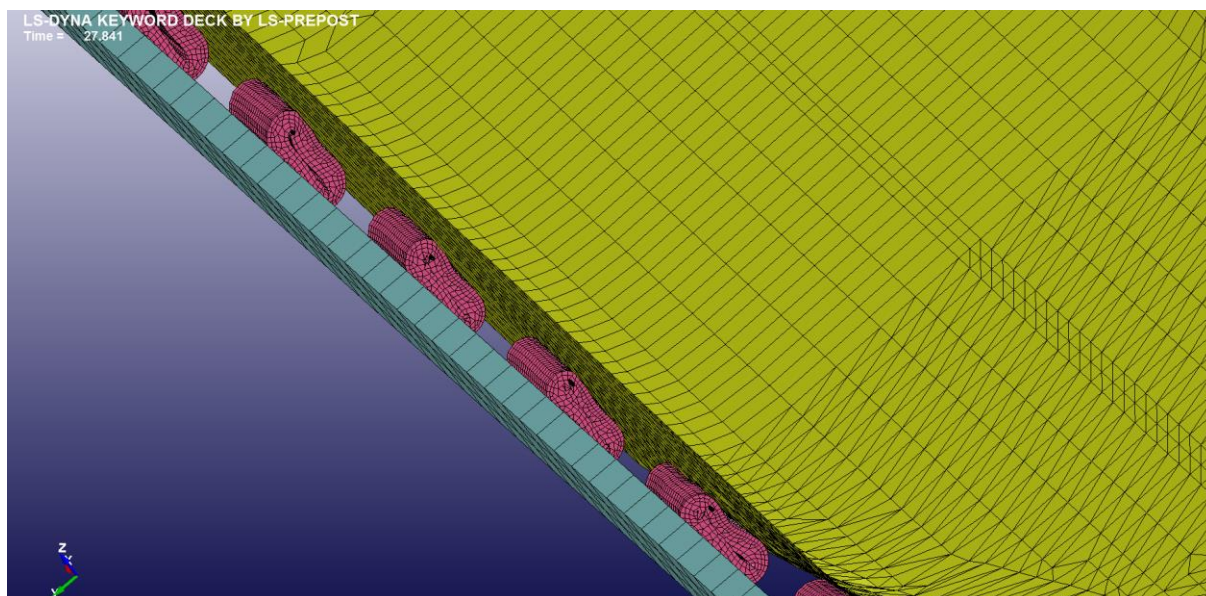
Slika 9.19. Pomak broda oko osi y



Slika 9.20. Pomak broda oko osi z

Slika 9.21. prikazuje deformacije odbojnika u području krme za drugi slučaj opterećenja. Veće deformacije su očekivane zbog dodatnog opterećenja od vjetra.





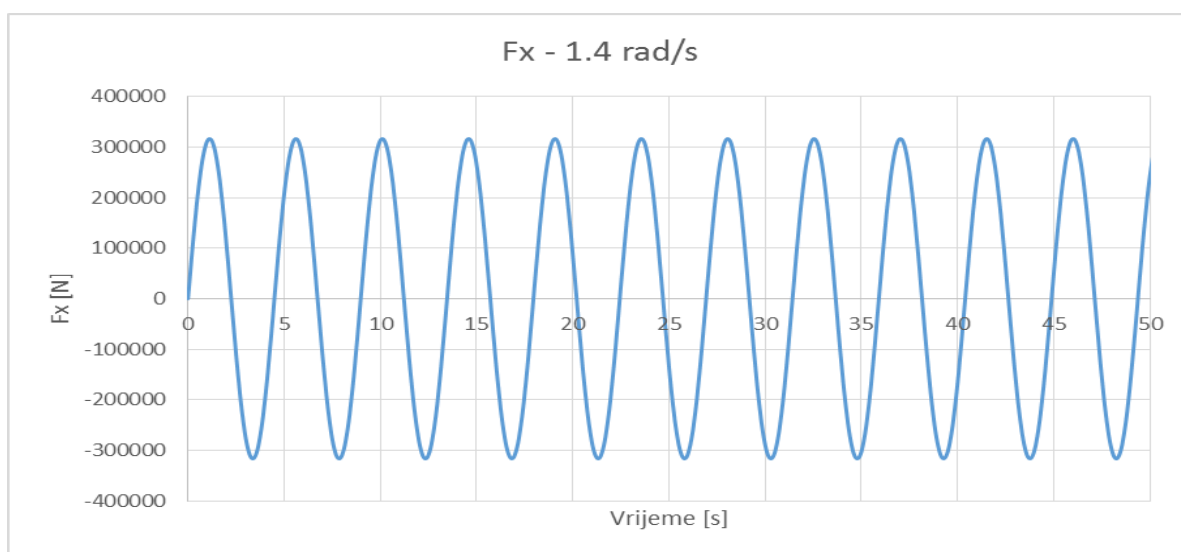
Slika 9.21. Deformacije odbojnika u području krme

### 9.3. Treći slučaj - jugozapadni vjetra i nailazni valovi pod $135^\circ$

U trećem slučaju opterećenja broda čine uzbudne sile i momenti nailaznih valova, dobivenih pomoću programa HydroSTAR. Susretni kut je  $135^\circ$  (prema slici 5.1.), a frekvencija vala je  $1.4 \text{ rad/s}$ . Obilježja valova i vjetra preuzeti su iz [3] za 100 godišnji povratni period.

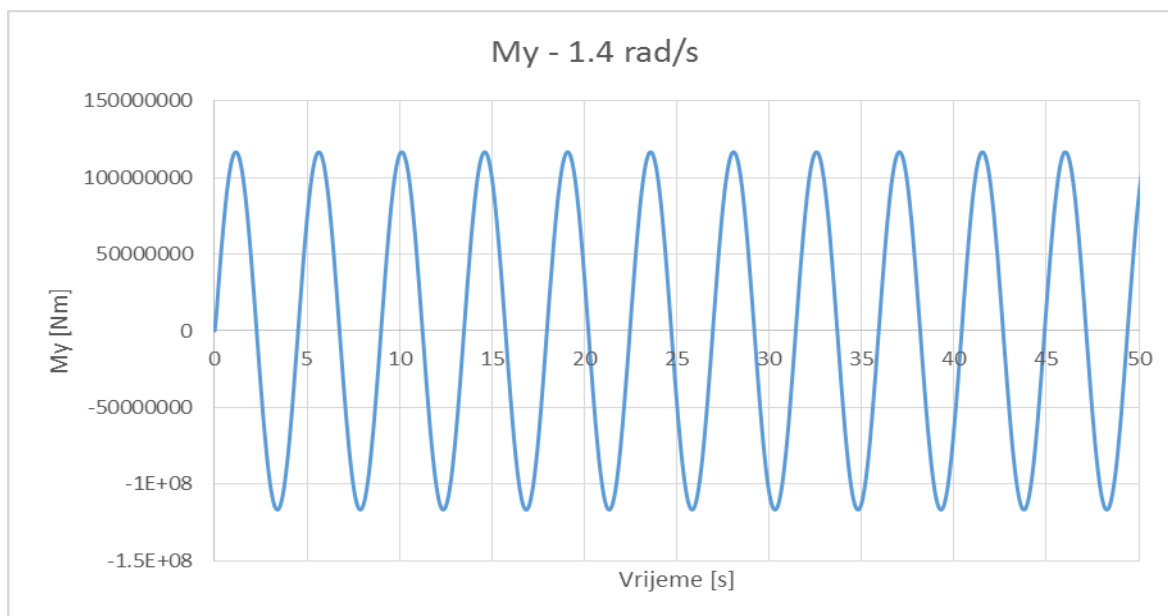
Opterećenja još čine sile vjetra i moment zaošijanja. Komponente sile i moment zaošijanja određeni su prema pravilima iz poglavlja 6 za satnu brzinu u iznosu od  $20.2 \text{ m/s}$ . Vjetar je jugozapadnog smjera (lebić), a kut upada vjetra na brod bi prema slici 5.1. iznosio  $157.5^\circ$ . Veličine komponenti sile vjetra i momenta zaošijanja iznose:  $F_x = -31026 \text{ N}$ ,  $F_y = 119188 \text{ N}$ ,  $M_z = 1519505 \text{ Nm}$ .

Na sljedećim dijagramima prikazana su tri od šest komponenti opterećenja valova.



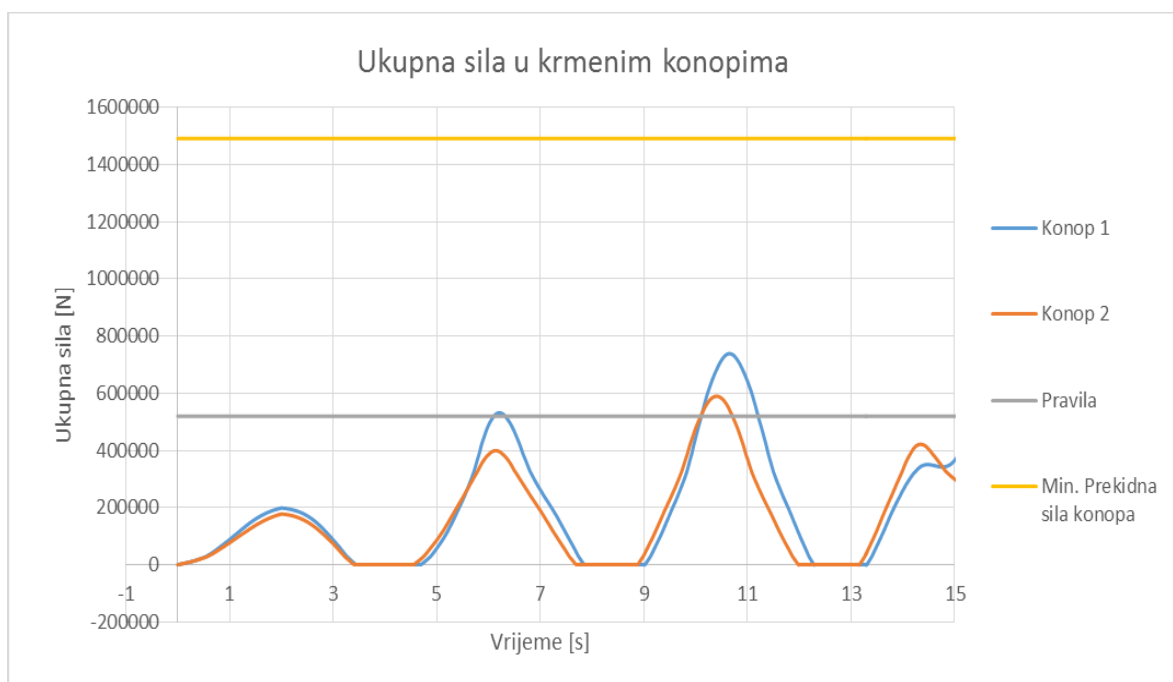
Slika 9.22. Komponenta uzbudne sile u uzdužnom smjeru



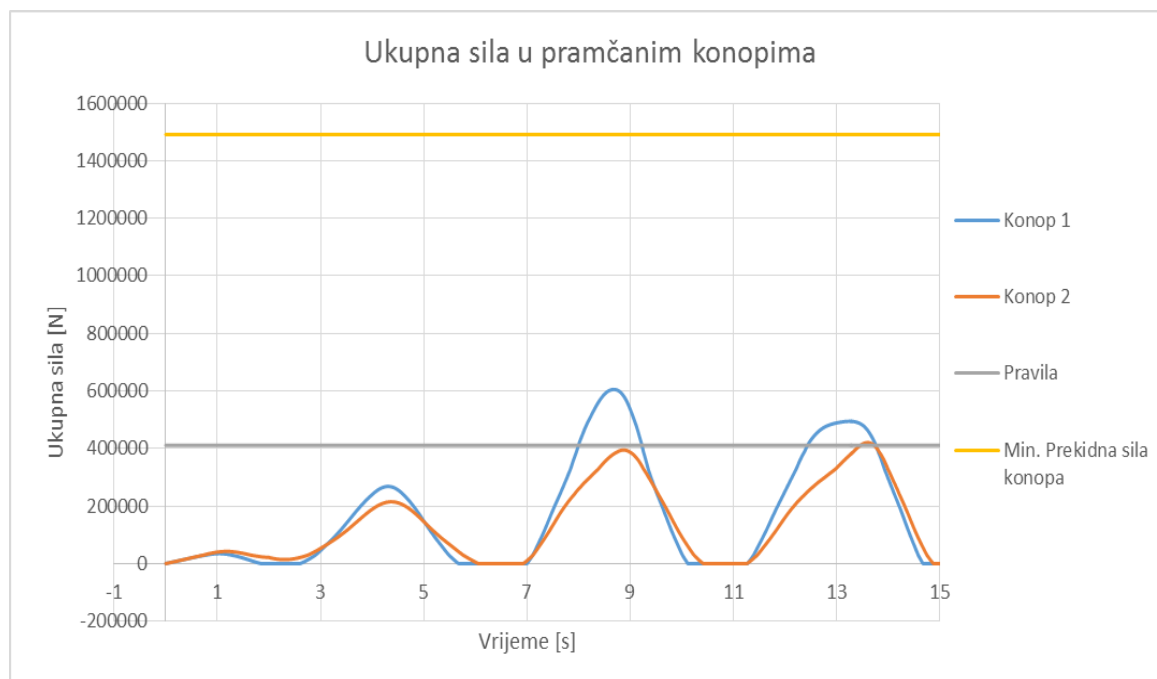


Slika 9.23. Uzbudni moment posrtanja

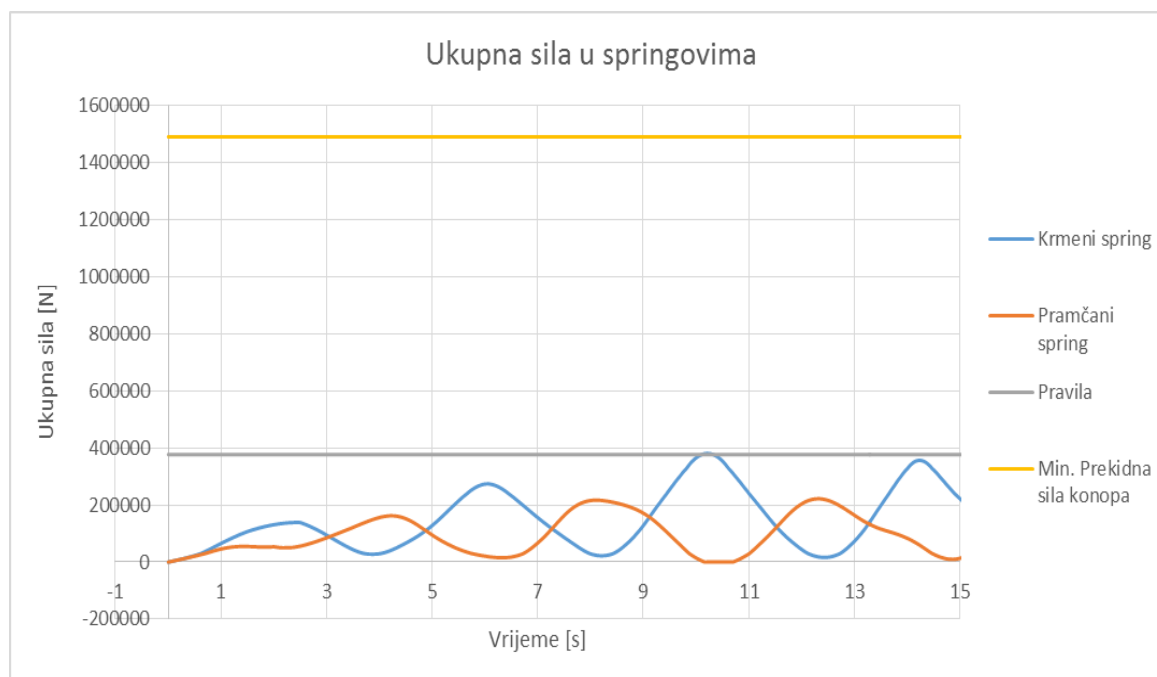
Ukupne sile u konopima priveznih linija prikazane su na slijedećim dijagramima uključujući i sile dobivene prema pravilima iz poglavlja 6 za jedan od konopa privezne linije. Dijagrami prikazuju i vrijednost minimalne prekidne sile konopa.



Slika 9.24. Ukupne sile u krmenim konopima



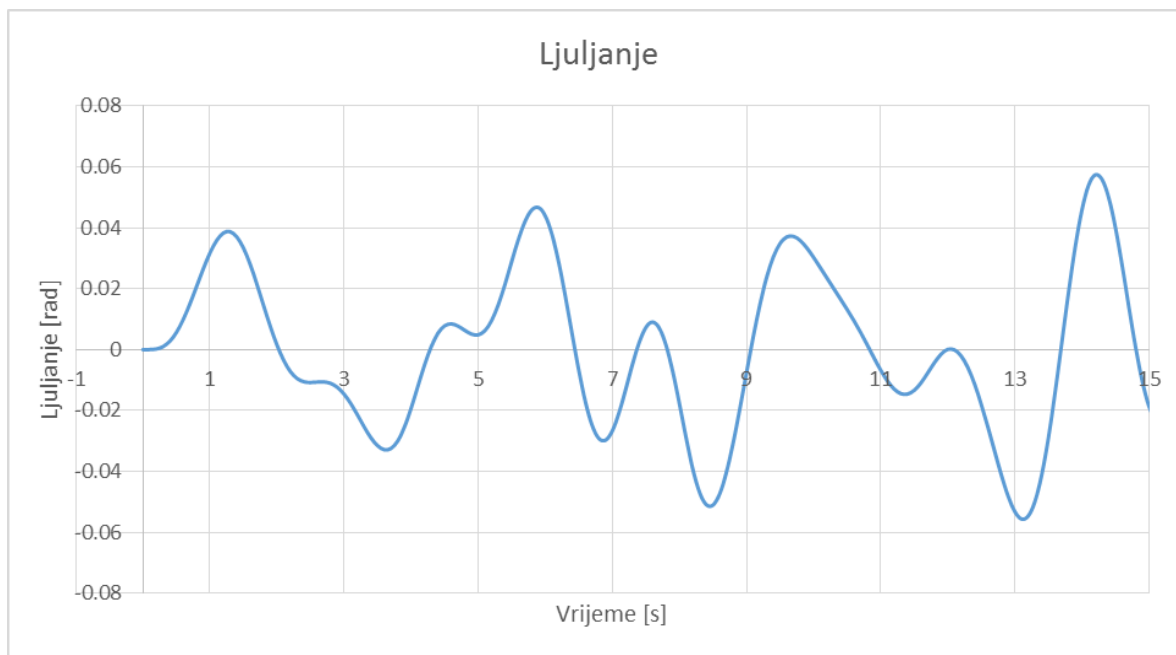
Slika 9.25. Ukupna sila u pramčanim konopima



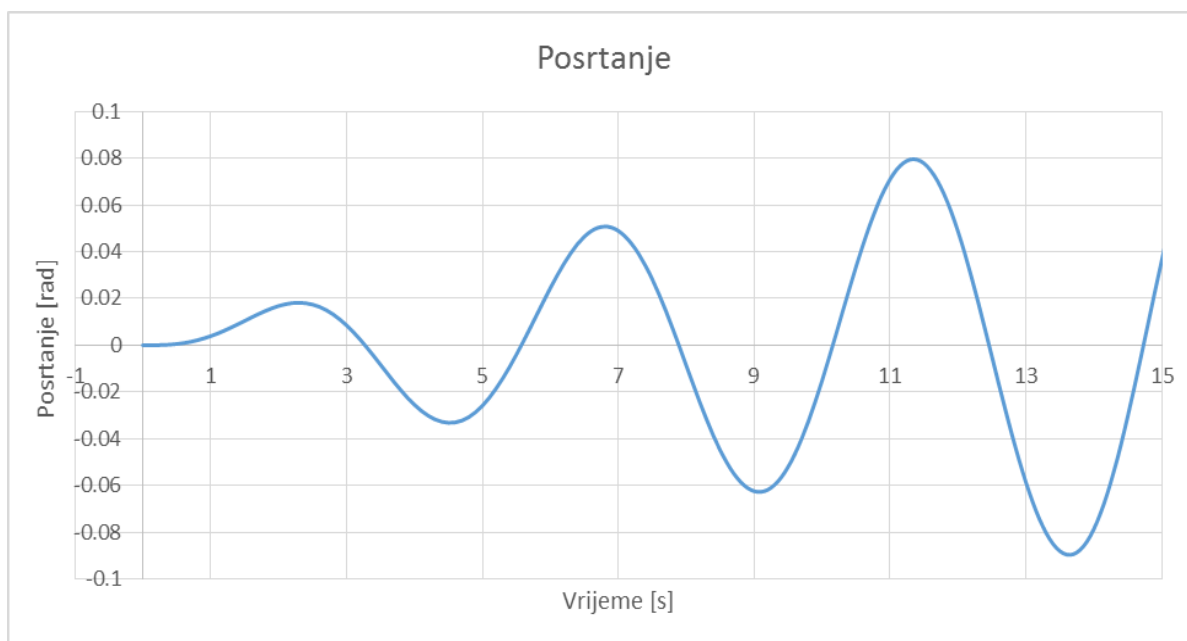
Slika 9.26. Ukupna sila u springovima

Maksimalna sila u jednom od krmenih konopa iznosi 738000 N, odnosno oko 75 tona što je 2 puta manje od minimalne prekidne sile konopa. U pramčanim konopima maksimalna sila iznosi 605000 N, odnosno 61 tona, što je 2.5 puta manje od minimalne prekidne sile, dok maksimalna sila u springovima iznosi 380000 N, odnosno 39 tona što znači 3.9 puta manje od prekidne sile.

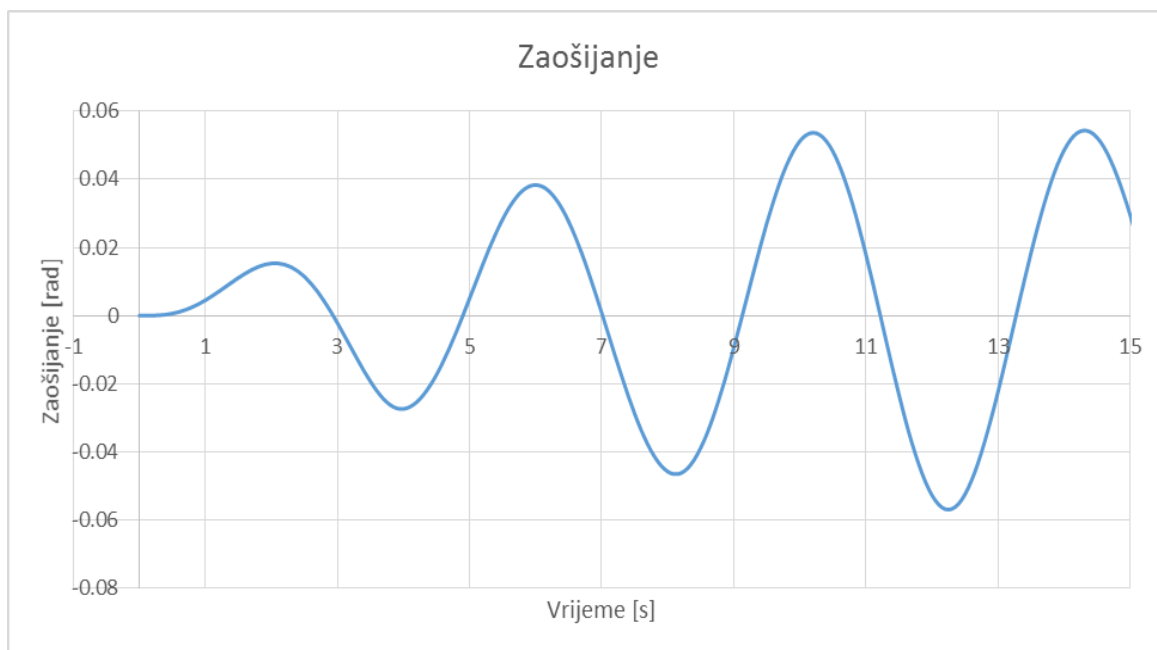
Na slijedećim dijagramima prikazani su rezultati pomaka broda za sva tri rotacijska stupnja slobode.



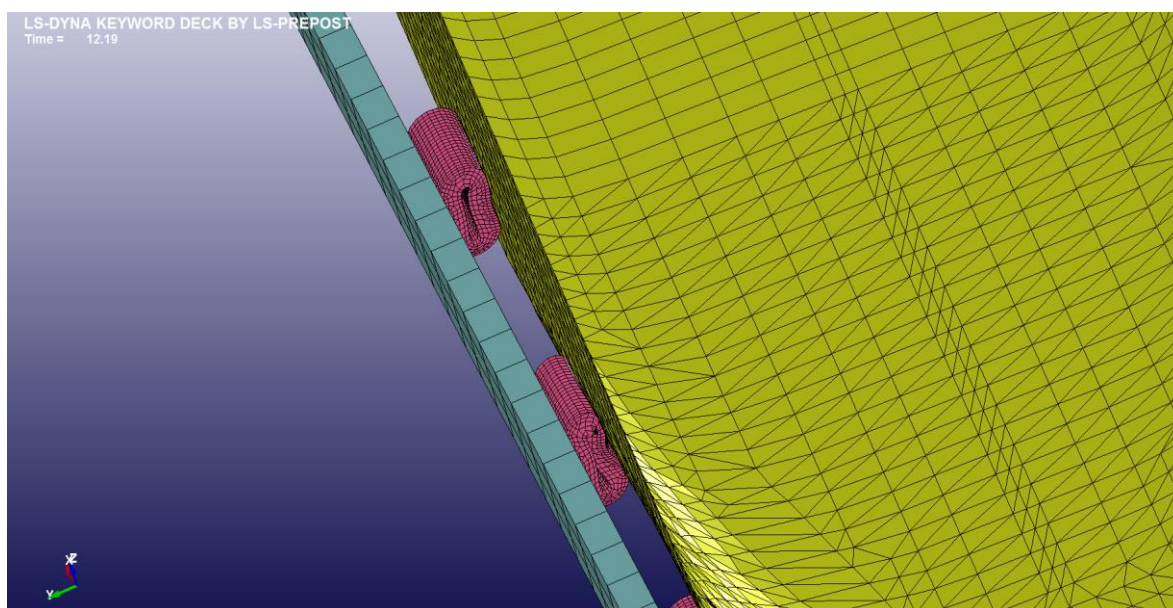
Slika 9.27. Pomak broda oko osi x



Slika 9.28. Pomak broda oko osi y



Slika 9.29. Pomak broda oko osi z



Slika 9.30. Deformacije odbojnika u području krme

Slika 9.30. prikazuje deformacije odbojnika za treći slučaj opterećenja. Može se smatrati da je jedan od krmenih odbojnika izgubljen jer je došlo do prekomjernih deformacija i kontakta unutarnjih površina odbojnika.

## 10. Zaključak

Na ponašanje privezanog broda osim opterećenja uzrokovanih nailaznim valovima, vjetrom i morskim strujama utječe i sam privezni sustav. Privezni sustav koji se sastoji od priveznih linija i sustava bokobrana uzrokuje visok stupanj nelinearnosti problema koji za rješavanje zahtijeva upotrebu naprednih numeričkih alata kao što je LS-DYNA/MCOL. Analizirani model privezanog broda je omogućio analizu ponašanja gumenih odbojnika u kontaktu sa brodom, kao i određivanje sila razvlačenja u konopima priveznih linija. Proračun je proveden za dva slučaja opterećenja nailaznih valova i vjetra. Dimenzije konopa su odabrane za ekstremno jačinu vjetra od 40 m/s u bok broda s koeficijentom sigurnosti 3. Vrijednosti opterećenja u konopima dobivena numeričkom analizom za 1. i 2. slučaj su u sigurnom području u odnosu na minimalnu prekidnu silu konopa i koeficijent sigurnosti iznosi 4.2 što zadovoljava pravila. Međutim za treći slučaj opterećenja najmanja vrijednost koeficijenta sigurnosti je za krmene konope i iznosi 2, što ne bi zadovoljilo pravila. Dimenzije gumenih odbojnika odabranih prema pravilima, nisu bile dovoljne za apsorpciju kinetičke energije broda analiziranih slučajeva opterećenja. Nakon pokretanja prve analize proračun je nakon 15 sekundi stao zbog prevelike deformacije jednog odbojnika, nakon čega su dimenzije odbojnika povećane. Međutim i nakon povećanja isti odbojnik na krmi još uvijek je imao velike deformacije. Jedno od rješenja može biti smanjivanje razmaka između odbojnika. Međutim analizirani model iziskuje dugotrajan proračun zbog velikog broja konačnih elemenata modela odbojnika. Za potpuno ispitivanje ponašanja privezanog broda potrebno je se usredotočiti na gibanja broda i provesti simulaciju u trajanju od nekoliko sati, te obuhvatiti sve značajnije smjerove nailaznih valova i vjetra što sa ovakvim modelom nije moguće. Za takvu analizu potrebno je unaprijediti model na način da se trodimenzionalni model odbojnika zamjeni jednodimenzionalnim, odnosno da se djelovanje odbojnika na brod ostvari pomoću jednodimenzijalnih konačnih elemenata opruga.

## Literatura

- [1] Prpić-Oršić, J., Slapničar, V., Turk, A.: *Berth operability estimation related to ship motion*, 2013.
- [2] Villa-Caro, R., Carral, J. C., Fraguera, J. A., Lopez, M., Carral, L.: *A review of ship mooring systems*, Brodogradnja 69(2018)1.
- [3] *Maritimna studija LNG FSRU Krk*, Pomorski fakultet u Rijeci, Rijeka, 2017.
- [4] Prpić-Oršić, J., Čorić, V.: *Pomorstvenost plovni objekata*, Zigo, Rijeka, 2006.
- [5] Radan, D.: *Uvod u hidrodinamiku broda*, Sveučilište u Dubrovniku, Dubrovnik, 2004.
- [6] Srdelić, M.: *Diplomski rad*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2010.
- [7] Drobilo, L.: *Završni rad*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2011.
- [8] Yeong, G. K., Sang, J. K., Jeom, K. P.: *Contribution of a deformable striking-ship structure to the structural crashworthiness of ship-ship collisions*, ICSOS, 2017.
- [9] Le Sourné, H., Couty, N., Besnier, F., Kammerer, C., Legavre, H.: *LS-DYNA applications in shipbuilding*, 4<sup>th</sup> European LS-DYNA Users Conference.
- [10] *DDS -582-1 Calculations for mooring systems*, Naval Sea Systems Command, Washington, 1987.
- [11] *Significant Ships of 2006.*, The Royal Institution of Naval Architects, London, 2007.
- [12] Marlow Ropes Datasheet – Nylon Viking Braidline
- [13] *PIANC - Guidelines for the Design of Fenders Systems*, International Navigation Association, 2002.
- [14] *FENTEK Marine Fendering Systems*, FENTEK Marine Systems GmbH, Hamburg.
- [15] Grm, A., Perković, M.: *Structural impact of circular buckling fenders on tanker hull*, Faculty of Maritime Studies and Transport, Portorož, 2018.